

# **SIMULAATIOTYÖKALUN KEHITTÄMINEN VILJAN KUIVAUSKAPASITEETIN OPTIMOINTIIN**

Antti Ruukonen  
Maisteritutkielma  
Helsingin yliopisto  
Maataloustieteiden laitos  
Agroteknologia  
Helsinki 2020

HELSINGIN YLIOPISTO — HELSINGFORS UNIVERSITET — UNIVERSITY OF HELSINKI

Tiedekunta/Osasto — Fakultet/Sektion — Faculty <b>Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta</b>		Laitos — Institution — Department <b>Maataloustieteiden laitos</b>	
Tekijä — Författare — Author <b>Antti Ruokonen</b>			
Työn nimi — Arbetets titel — Title <b>Simulaatiotyökalun kehittäminen viljan kuivauskapasiteetin optimointiin</b>			
Oppiaine — Läroämne — Subject <b>Agroteknologia</b>			
Työn laji — Arbetets art — Level <b>Maisterintutkielma</b>	Aika — Datum — Month and year <b>11/2020</b>	Sivumäärä — Sidoantal — Number of pages <b>52</b>	
<p>Tiivistelmä — Referat — Abstract</p> <p>Pohjoisesta sijainnista johtuen Suomen kasvukausi on muihin viljantuottajamaihin verrattaessa lyhyempi. Siitä seuraa se, että viljan korjuukosteus on liian korkea säilymisen kannalta. Säilymisen varmistamiseksi viljasato on käsiteltävä jollain tavoin ennen varastointia. Valtaosa Suomen viljasadosta kuivataan alle 14 painoprosentin kosteuteen säilyvyyden varmistamiseksi varastoinnissa.</p> <p>Työn tavoitteena oli kehittää simulointityökalu, jota voidaan käyttää apuvälineenä, kun aletaan suunnittelemaan kuivurihankintaa. Työkalulla oli pystyttävä selvittämään tarvittava kuivurin koko sekä uunin teho kyseessä olevalle kuivauskapasiteetin tarpeelle. Määrittäviä tekijöitä tarvittavan kuivauskapasiteetin selvittämiseksi olivat kuivattavan viljan määrä (kokonaissato) ja kuivauspäivien lukumäärä.</p> <p>Simulaatiotyökalun toiminnallisuudelle asetettiin reunaehdoiksi se, että työkalu on käyttäjän kannalta helppokäyttöinen ja nopeasti omaksuttavissa. Työkalun käyttö piti onnistua yleisesti käytössä olevilla pc -tietokoneella ja siinä olevilla laskentaohjelmilla. Simulointityökalun rakennuslujaksi valikoitui MS Excel taulukkolaskentaohjelma ja siinä oleva VBA – ohjelmointisovellus. Tämän lisäksi työkalulla oli päästävä <math>\pm 30</math> % haarukkaan todellisista arvoista.</p> <p>Testauksen perusteella voitiin todeta, että työlle asetetut vaatimukset saatiin toteutettua. Tarvittavat lähtöarvot oli helppo syöttää simulointia varten sekä ne olivat helposti saatavilla oikeissa muodoissa. Tavoitteeksi asetetut tulokset, kuivurin koko, uunin teho ja kuivausaika, olivat selkeästi nähtävissä ja tarkkuudessa päästiin asetettuihin tavoitteisiin. Myöskään simulaation laskentavaiheessa ei ollut ongelmia ja operaatio oli riittävän nopea.</p>			
Avainsanat — Nyckelord — Keywords <b>viljankuivaus, simulointityökalu, kuivauskapasiteetti, uunin teho</b>			
Säilytyspaikka — Förvaringsställe — Where deposited <b>Maataloustieteiden laitos ja Viikin kampuskirjasto</b>			
Muita tietoja — Övriga uppgifter — Further information <b>Työtä ohjasi professori Jukka Ahokas ja apulaisprofessori Antti Lajunen...</b>			

HELSINGIN YLIOPISTO — HELSINGFORS UNIVERSITET — UNIVERSITY OF HELSINKI

Tiedekunta/Osasto — Fakultet/Sektion — Faculty <b>Faculty of Agriculture and Forestry</b>		Laitos — Institution — Department <b>Department of Agricultural Sciences</b>	
Tekijä — Författare — Author <b>Antti Ruokonen</b>			
Työn nimi — Arbetets titel — Title <b>Development of a Simulation Tool for Optimization of Grain Drying Capacity</b>			
Oppiaine — Läroämne — Subject <b>Agricultural Engineering</b>			
Työn laji — Arbetets art — Level <b>Master's thesis</b>		Aika — Datum — Month and year <b>11/2020</b>	Sivumäärä — Sidoantal — Number of pages <b>52</b>
<p>Tiivistelmä — Referat — Abstract</p> <p>Due to its northern location, Finland's growing season is shorter compared to other grain-producing countries. As a result, the harvest moisture of the grain is too high for preservation. To ensure preservation, the grain crop must be processed in some way before storage. Most of the Finland's grain harvest is dried to a moisture content of less than 14% by weight to ensure preservation during storage.</p> <p>The aim of the work was to develop a simulation tool. which can be used as an aid when starting to plan a dryer procurement. The tool had to be able to determine the required dryer size as well as the oven power for the drying capacity requirement in question. Determinants of the required drying capacity were the amount of grain to be dried (total yield) and the number of drying days.</p> <p>The boundary conditions for the functionality of the simulation tool were that the tool is easy for the user to use and quick to adopt. The use of the tool had to be successful with the commonly used PC and the calculation programs on it. MS Excel spreadsheet program and the VBA programming application were chosen as the building platform for the simulation tool. In addition, the tool had to reach <math>\pm 30\%</math> of the actual values.</p> <p>Based on the testing, it could be stated that the requirements set for the work were met. The required output values were easy to enter for simulation and were readily available in the correct formats. The target results, dryer size, oven power and drying time, were clearly visible and the set targets were met with precision. There were also no problems in the calculation phase of the simulation and the operation was fast enough.</p>			
Avainsanat — Nyckelord — Keywords <b>Grain drying, simulation tool, grain drying capacity, oven power</b>			
Säilytyspaikka — Förvaringsställe — Where deposited <b>Department of Agricultural Sciences and Viikki Campus Library</b>			
Muita tietoja — Övriga uppgifter — Further information <b>Professor Jukka Ahokas and Assistant Professor Antti Lajunen</b>			

## Sisällysluettelo

1	JOHDANTO .....	6
2	KIRJALLISUUS.....	8
2.1	Viljan kuivauksen perusteet .....	8
2.1.1	Viljan säilyvyys .....	8
2.1.2	Jyvän kuivuminen.....	9
2.1.3	Ilma kuivausaineena.....	9
2.1.4	Kuivumiseen vaikuttavat tekijät .....	11
2.2	Kuivurin rakenne .....	11
2.2.1	Kennokuivurin periaate.....	11
2.2.2	Eräkuivuri .....	13
2.2.3	Jatkuvatoiminen kuivuri .....	14
2.2.4	Kuivuriuunit .....	14
3	TUTKIMUKSEN TAVOITTEET .....	16
4	AINEISTO JA MENETELMÄT .....	17
4.1	Tutkimuksen esittely .....	17
4.2	Simulaattorin toimintaperiaate .....	17
4.2.1	Adiabaattilämpötilan laskeminen -ohjelma .....	19
4.2.2	Kuivausohjelma .....	20
4.2.3	Käyttöliittymä.....	23

4.2.4	Lähtöarvojen käsittely.....	24
5	TULOKSET .....	27
5.1	Simulaattorin käytettävyys .....	27
5.2	Simulaattoriajo ja tulosten kerääminen .....	27
5.2.1	Koetilan kuivuri I.....	27
5.2.2	Koetilan kuivuri II.....	31
5.2.3	Jaakko kuivuri .....	34
6	TULOSTEN TARKASTELU .....	39
6.1	Simulaattorin käytettävyys .....	39
6.2	Simulaattoriajon tulosten tarkastelu .....	40
6.2.1	Kuivausaika .....	40
6.2.2	Uunin teho .....	44
6.2.3	Veden poistuminen.....	45
7	JOHTOPÄÄTÖKSET .....	46
7.1	Käytettävyys .....	46
7.2	Lähtötietojen saaminen.....	47
7.3	Simulaattorin tarkkuuden arviointi.....	48
7.4	Mahdolliset jatkotutkimukset .....	49
8	KIITOKSET .....	50
9	LÄHTEET.....	51
	LIITTEET	

## 1 JOHDANTO

Suomi on yksi Euroopan pohjoisimpia alueita, jossa harjoitetaan viljanviljelyä. Vuonna 2012 Suomessa korjattiin 1,2 miljoonalla peltotehtaarilta noin 3,7 miljardin kg:n viljasato. Pohjoisen sijainnin vuoksi kasvukausi on meillä muuhun Eurooppaan nähden lyhyempi ja viljan puintikosteus on liian korkea säilymistä ajatellen. Tämän vuoksi viljasato joudutaan käsittelemään ennen varastointia, jotta se säilyisi varastoissa käyttökelpoisena. Käsittelyyn on olemassa useampiakin vaihtoehtoja, mutta valtaosa viljasta kuivataan alle 14 % vesipitoisuuteen massasta. Tämä kosteusprosentti varmistaa viljan laadun säilymisen varastoissa riittävän pitkään.

Yleisin kuivatusmenetelmä Suomessa on viljaa kierrättävä lämminilmaeräkuivuri. Kyseisessä kuivurityypissä viljaa kierrätetään kuivauskennoissa. Kuivauskennojen läpi puhalletaan lämmitettyä ilmaa, joka sitoo itseensä kosteutta ja näin ollen poistaa kosteutta viljasta. Kuivaustoiminnon lisäksi kuivurikokonaisuuteen kuuluvat kiinteästi myös viljan puhdistaminen roskista sekä viljan kuljettaminen. Puhdistaminen suoritetaan yleensä esipuhdistajalla ja viljan kuljetus elevaattorin ja erilaisten putkistojen avulla. Edellä mainitun kuivurityypin lisäksi muitakin tyyppisiä, kuten esimerkiksi jatkuvatoiminen kuivuri, kylmäilma-kuivuri ja lavakuivuri. Näille kaikille kuivurityypeille yhteisenä tekijänä on kuitenkin se, että jyvässä olevaa kosteutta poistetaan ilman avulla.

Lämmintä ilmaa saadaksemme tarvitaan energialähde. Yleisin energialähde Suomessa on öljylämmitteinen kuivuriuuni. Uunia lämmitetään polttamalla polttimen avulla polttoöljyä. Uunin läpi laitetaan kulkemaan ilmavirta, joka lämpenee haluttuun lämpötilaan riippuen uunin tehosta. Öljyn lisäksi uunin lämmityksessä voidaan käyttää biopolttoaineita, kuten esimerkiksi puuhaketta, turvetta tai puupellettejä. Myös maakaasu ja nestekaasu sopii uunin lämmitykseen. Jopa kaukolämmölläkin toimivia kuivureita on käytössä.

Kuivuri-investointia suunniteltaessa, ensimmäisenä selvittää kuivurin koko. Kuivurin koolle tai sen kapasiteetille on vaikea antaa selviä valintaohjeita. Kokoon vaikuttavia tekijöitä ovat viljelyala, viljeltävät lajikkeet sekä mitoitetanko kuivurin

koko keskimääräisen vai huonojen olosuhteiden mukaan. Kokoon vaikuttaa myös se halutaanko kuivata ympäri vuorokauden vai vain päiväsaikaan. Hyvin voimakkaasti vaikuttava tekijä on viljan puintikosteus. Kuivurin koolla yleisesti tarkoitetaan kuivaussiilon tilavuutta. tämän lisäksi pitää selvittää kuivurin tilavuuteen sopiva uunin teho ilman lämmitykseen. Uunin pitää olla riittävän tehokas, jotta se pystyy lämmittämään kuivausilman lämpötilan riittävälle tasolle, jolloin kuivaus on nopeaa ja hyötysuhde optimaalinen. Puhallinta valittaessa ilmamäärä pitää sovittaa uunin tehon mukaan. Ilmavirran nopeus ei myöskään saa nousta liian suureksi. Vaarana on, että liian suuri ilmavirtaus puhalttaa kuivurissa oleva jyvät kuivausilman poistokanaviin.

Työn tavoitteena on kehittää simulointityökalu kuivuri-investoinnin suunnittelun avuksi. Simulaattorilla on voitava määritellä tarvittava kuivurin koko ja uunin teho suunniteltavan kohteen kuivaustarpeisiin.

Simulointityökalun on rakennettava niin, että se on helppokäyttöinen ja sitä voidaan käyttää yleisesti käytössä olevalla –taulukkolaskentaohjelmalla, MS Excelillä. Simulointityökalun laskemien tulosten tarkkuuden oli pystyttävä työlle asetettujen vaatimusten rajoissa. Tarvittavat makrot ja ohjelmoinnit voidaan tehdä ohjelmistossa olevan VBA (Visual Basic) -sovelluksen avulla. Myös simulointityökalun ulkoasuun ja käyttöliittymään kiinnitetään huomiota. Sen pitää olla selkeä ja helppokäyttöinen.

## 2 KIRJALLISUUS

### 2.1 Viljan kuivauksen perusteet

Pohjoisissa olosuhteissa viljan puintikosteus on pääsääntöisesti liian korkea, jotta vilja säilyisi vahingoittumattomana varastoinnin aikana. Vilja biomateriaalina alkaa pilaantua sen ollessa liian kosteaa. Säilyvyyden varmistamiseksi varastoinnin aikana vilja on kuivattava tiettyyn kosteusprosenttiin.

Viljankuivauksen periaate on yksinkertainen; siinä jyvistä poistetaan vettä. Jyvään tuodaan energiaa väliaineen avulla, joka haihduttaa veden pois jyvistä. Haihtunut vesi sitoutuu viljan ympärillä olevaan väliaineeseen, joka kuljettaa veden pois. Nykyisissä kuivureissa väliaineena on ilma, jonka avulla vesi kuljetetaan pois. Ilman kykyyn sitoa pois kuljetettavaa vettä vaikuttaa sen kosteus ja lämpötila.

#### 2.1.1 Viljan säilyvyys

Suomessa viljan puintikosteus on usein 25 , , 30% . Se ei sellaisenaan ole varastointikelpoista. Jyvien hengitys jatkuu ja pieneliöt, kuten bakteerit, sienet ja alkueläimet, kuluttavat viljan ravintoaineita. Pieneliöiden ja viljan hengitys tuottaa energiaa, jonka vaikutuksesta viljan lämpötila alkaa nousta voimakkaasti. Tämä taas edesauttaa pieneliöiden lisääntymistä ja viljan ravintoaineita hajottava hengitystoiminta vilkastuu. (Kleemola, E., ym. 1994)

Viljan säilymisen kannalta olisi tärkeää saada pysäytetyksi pieneliöiden toiminta sekä jyvän hengitys. Toimiakseen nämä tarvitsevat happea, vettä ja lämpöä sekä happamuudeltaan oikean ympäristön. Näitä olosuhteita muuttamalla voidaan vaikuttaa viljan säilyvyyteen. (Kleemola, E., ym. 1994)

Suomessa viljasadosta noin 90 % säilötään kuivaamalla. Säilyvyys perustuu viljan kosteuden alenemiseen 14 prosenttiin painosta, jolloin jyvien hengitys vähenee ja jyvät ovat lepotilassa. Myös viljaa pilaavien pieneliöiden elinmahdollisuudet heikkenevät kuivatussa viljassa. (Kleemola, E., ym. 1994). Herkin viljan laatuominaisuus on itävyys. Se huononee ennen kuin muut



ominaisuudet, kuten leipomiseen ja makuun liittyvät ominaisuudet (Ahokas. J., ym. 2011).

### **2.1.2 Jyvän kuivuminen**

Biomateriaaleissa vesi voi olla huokoisten välissä olevassa ilmassa vesihöyrynä tai huokosten rajapinnalla joko kemiallisesti tai fysikaalisesti sitoutuneena vetenä. Vesi voi olla myös jokseenkin vapaan veden tapaan käyttäytyvänä kapillaarivetenä. (Hautala, 2004). Jyvän sisältä siirtyy vettä pinnalle sitä mukaa, kun ulkopinnalta poistuu. Haihtumisnopeus on vakio (Ahokas. J, ym. 2011).

Vapaan veden varastoiden ehtyessä märän ja kuivan materiaalin rajapinta siirtyy jyvän sisälle kohti keskustaa, kunnes kapillaarivesi loppuu. Tällöin jyvässä on jäljellä enää pintoihin sitoutunut vesi. Tällöin vesi voi kulkea paikasta toiseen höyrystyneenä. Höyry siirtyy joko kahden pisteen välillä olevan kokonaispaine-eron vaikutuksesta tai diffuusion vaikutuksesta. (Ahokas. J., ym. 2011).

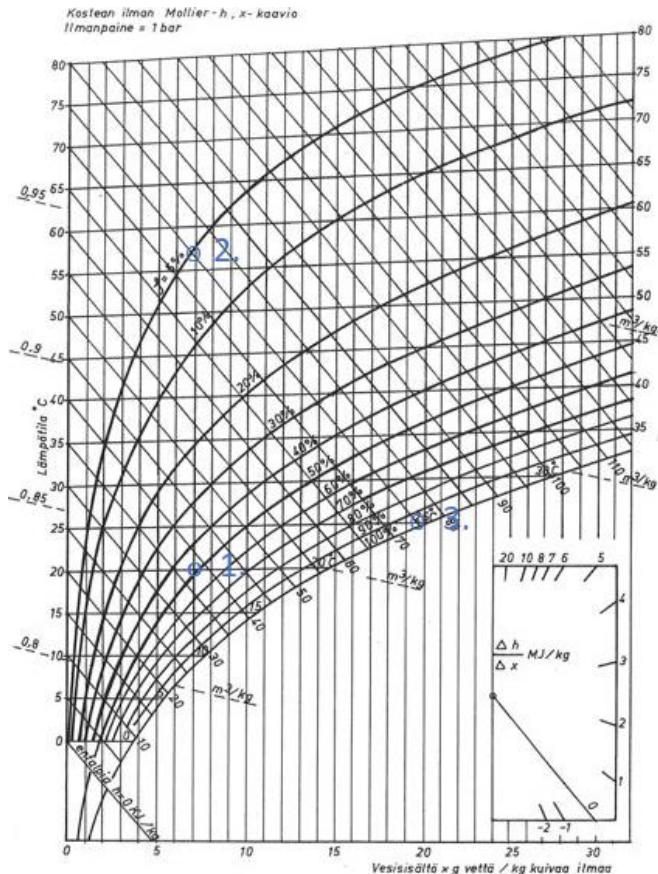
Jyvän kuivuminen perustuu veden haihduttamiseen jyvän pinnalta. Haihtuminen tapahtuu, kun ympäröivä ilma on riittävän kuivaa. Sekä ilmassa että kuivattavassa materiaalissa oleva kosteus pyrkii tasapainoon. Tällöin kosteammasta materiaalista siirtyy vettä ympäröivään ilmaan, kunnes tasapainokosteus on saavutettu. Tasapainokosteus riippuu ilman lämpötilasta. Lämpimässä ilmassa tasapainokosteus on matalampi, joten vesi haihtuu helpommin. (Ahokas. J, ym. 2011, Peltola 1997)

Kuivauksen alkuvaiheessa kostea jyvä kuivuu nopeasti, sillä jyvän koko pinta on kostea ja se kuivuu koko pinta-alan alueelta. Jyvän kuivuminen alkaa kuitenkin hidastua, kun kosteusprosentti laskee alle 30 painoprosentin. Kuivuminen hidastuu, koska kosteuden pitää siirtyä jyvän sisältä jyvän pinnalle.

### **2.1.3 Ilma kuivausaineena**

Kuivausilma on pääsääntöisesti ilman ja vesihöyryn sekoitus. Kuiva ilma on sekoitus eri kaasuja. Pääkomponentit ovat happi ja typpi. Lisäksi muita kaasuja ovat mm. argon ja hiilidioksidi (Brooker, Donald. 1992). Ilman kuivauskyky

perustuu sen kykyyn sitoa verihöyryä. Sitoutuneen veden määrällä on tietty maksimi. Kun vesi on sitonut maksimaalisen määrän vettä, tätä tilaa kutsutaan kyllästymistilaksi. Mollierin diagrammin avulla, kuva 1, voidaan tarkastella ilman kykyä sitoa vesihöyryä. (Ahokas. J., ym. 2011).



Kuva 1 Mollierin diagrammi (Peltola, A. 1997)

Mollierin diagrammissa on yleisesti vaaka-akselilla kosteussuhde  $x$ , ja pystyakselilla lämpötila  $T$  (Celcius). Kylläisen höyryn käyrä on saatu mittauksilla. Tämän jälkeen on voitu piirtää suhteellisen kosteuden (RH) käyrät. Lisäksi diagrammista löytyy kostean ilman entalpiasuorat. (Ahokas. J., ym. 2011). Diagrammia luetaan niin, että esimerkiksi ympyrän 1. kohdalla ilman lämpötila on n. 20 °C (pystyakseli) ja ilman suhteellinen kosteus 50 % (käyrä). Kun tämä ilma lämmitetään n. 67 asteiseksi, ilman suhteellinen kosteus onkin enää n. 5 %. Lämmitetty ilma pystyy sitomaan huomattavasti enemmän kosteutta itseensä. Kohdassa 3. nähdään ilman kosteus (n.98 %), kun sama ilman lämpötila on laskenut 25 asteeseen.

### **2.1.4 Kuivumiseen vaikuttavat tekijät**

Jyvän kuivumisen nopeuteen vaikuttavat kuivausolosuhteet. Näitä ovat viljan kosteus, ulkoilman lämpötila sekä ilman suhteellinen kosteus, viljan hehtolitrapaino ja viljalaji. Viljan korjuukosteus ja haluttu loppukosteus määrittelevät viljasta haihdutettavan veden määrän. Näin ollen vilja pyritään korjaamaan pellolta mahdollisimman kuivana. Vilja kuivuu aktiivisesti 35 %, jonka jälkeen kuivumiseen vaikuttaa korjuukauden sää. Viljan kosteuden vaihteluväli on suuri eri vuorokauden aikoina. Syksyllä puintiaikaa rajoittaa myös lämpötilojen vaihtelu, joka aiheuttaa kastetta, eli kosteuden tiivistymistä kasvustoon. Ihanteellista puintiaikaa, jolloin ilman suhteellinen on alle 70 %, on monesti vain kahdesta kolmeen tuntiin. (Ahokas, J., & Koivisto, K., 1983).

Ulkolämpötila vaikuttaa merkittävästi kuivauksen energian kulutukseen. Viiden (5) asteen lämpötilan nousu vähentää energian kulutusta jopa 9 %. Energian säästämiseksi olisikin pyrittävä kuivaamaan päivällä, lämpötilan ollessa korkeimmillaan. Suosimalla aikaisia viljalajikkeita, päästään viljan korjuuseen aikaisemmin syksyllä, jolloin korjuu, ja kuivausolosuhteet ovat paremmat, kuin myöhemmin syksyllä. Myös ilman suhteellisella kosteudella on vaikutusta kuivumiseen. Mitä kuivempaa ilma on, sitä enemmän siihen sitoutuu kosteutta kuivattavasta aineesta

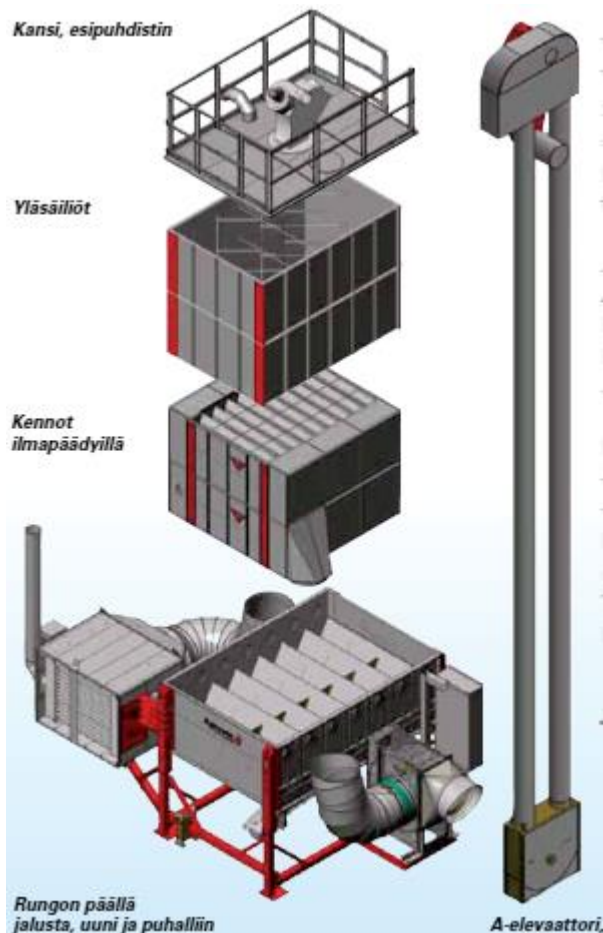
## **2.2 Kuivurin rakenne**

Nykyisin kuivureita löytyy rakenteeltaan kolmea eri tyyppiä. Ne ovat lavakuivuri, siilokuivuri sekä kennokuivuri. Toimintatavaltaan kuivuri voi olla joko jatkuvatoiminen tai eräkuivuri, lämminilma- tai Kylmäilmakuivuri. Seuraavassa käydään läpi kennokuivurin toimintaperiaate

### **2.2.1 Kennokuivurin periaate**

Kennokuivuri on nykyisin Suomessa yleisin käytössä oleva kuivurityyppi. Kennokuivurit ovat rakenteeltaan modulaarisia, ja ne koostuvat varasto- ja kuivauskennostoista. Kokoamalla kennostoja päällekkäin voidaan rakentaa tilavuudeltaan halutun kokoinen kuivurirakenne. Kennostojen lisäksi tarvitaan

myös varastokennoja kennostojen päälle. Varastokennoissa ei ole kuivausilmaharjoja, vaan niiden tarkoitus on kompensoida viljan kutistumaa, joka aiheutuu kosteuden poistumisesta viljan kuivausprosessin aikana. Varastokennoissa oleva vilja estää myös kuivausilman karkaamisen yläkautta. Kuvassa 2. on esitetty kennokuivurin perusrakenne.



Kuva 2 Kennokuivurin perusrakenne (Esite, Antti Teollisuus)

Varastokennojen (yläsäiliö) ja kuivauskennojen (kenno) lisäksi kennokuivuriin kuuluu kansi, esipuhdistin, elevaattori, ja jalusta. Jalustassa on syöttölaite. Lisäksi myös ilmapäädylä, uuni sekä puhallin.,

Kuivurin kuivauskennossa on ilmaharjat. Näistä joka toisesta puhalletaan kuivausilmaa ja joka toinen kenno on väylä poistoilmalle. Kuivattava vilja on jatkuvassa liikkeessä ja kuivausilma siirtyy kuivattavan ilman läpi tuloilmakennosta poistoilmakennoon. Kennorakenteen ansiosta kuivauksen kerrospaksuus on ohut sekä kuivausilma jakaantuu tasaisesti viljan sekaan ja

tuloksena on tasalaatuinen kuivaus. Kuivurin kennorakenteen alla, jalustassa olevalla syöttölaitteen avulla kuivattava vilja pidetään liikkeessä. Syöttölaitteella pystytään säätämään kuivattavan viljan kiertonopeutta. Elevaattorin avulla kuivattu vilja nostetaan, kuivurityypin mukaan, joko kennokuivurin yläpäässä oleviin varastokennoihin tai varastosiiiloihin odottamaan viljan jatkokäsittelyä. Kuivauskennon rakenteesta esimerkki kuvassa 3. (Ahokas, J.; 2011, Antti Teollisuus -esite)



Kuva 3 kuivauskennon rakenne

### 2.2.2 Eräkuivuri

Eräkuivurissa vilja kuivataan eränä. Toisin sanoen kuivuri täytetään, ja samaa viljaa kierrätetään kennostoissa elevaattorin ja syöttölaitteen avulla, kunnes viljan kosteusprosentti on saatu halutulle tasolle. Vilja kiertää useamman kerran kennoston läpi kuivauksen aikana. Kennorakenteen- sekä kierron ansiosta kuivattava vilja sekoittuu hyvin. Eräkuivurissa kennot ovat pystysuunnassa limittäin, eli poistoilmakennot ovat tuloilmakennojen välissä leveyssuunnassa. Tämä rakenne edesauttaa viljan sekoittumista. Elevaattorin ja kennoston välissä

esipuhdistaja, joka poistaa epäpuhtauksia kierron aikana. Eräkuivurissa viljan kiertonopeus on vakio koko kuivausprosessin aikana. (Bell, B., 1989)

Kun haluttu kuivatustulos on saavutettu, vilja pitää jäähdyttää, jottei sen pilaannu säilytyksen aikana. Vilja jäähdytetään puhaltamalla kylmää ilmaan kuivausilman tilalle, sekä kierrättämällä viljaa samoin, kuin kuivausprosessin aikana. Tätä jatketaan, kunnes on saavutettu haluttu viljan lämpötila. Jäähdytyksen jälkeen ilman puhallus katkaistaan ja kuivurin sisältö tyhjennetään varastoon. Tämän jälkeen kuivuri voidaan täyttää uudelleen kuivaustarpeessa olevalla viljalla ja toistaa kuivausprosessi. (Ahokas. J., ym. 2011 ja Peltola 1997).

### **2.2.3 Jatkuvatoiminen kuivuri**

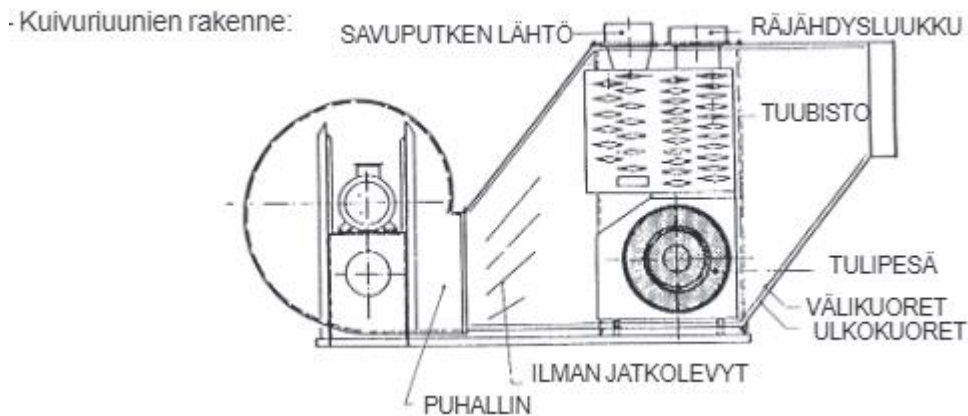
Jatkuvatoimisessa kuivurissa viljaa lisätään jatkuvasti kennostoon koko kuivausprosessin aikana. Viljan syöttönopeus kuivurin läpi sovitetaan kuivattavan viljan kosteuden mukaan niin, että vilja kennostosta ulos tullessaan on saavuttanut halutun kuivaustuloksen. Jatkuvatoiminen kuivuri soveltuu tilanteisiin, jossa saatavilla jatkuvasti samanlaatuista viljaa kuivattavaksi (sama lajike ja samanlainen kosteusprosentti). Jatkuvatoimisessa kuivurissa suurempi kapasiteetti verrattuna eräkuivuriin, koska siinä ei ole erillistä täyttö- ja tyhjennysvaihetta. Erittäin märkää viljaa kuivattaessa voidaan joutua kuivaamaan vilja kahdessa vaiheessa, jotta saavutettaisiin haluttu kuivaustulos. Jatkuvatoimisen kuivurin rakenne poikkeaa eräkuivurin rakenteesta siten, että alimmaiset ”kuivauskennot” toimivat viljan jäähdytyskennoina.

Jatkuvatoimisessa kennokuivurissa ulostulevan viljan kosteus saattaa vaihdella huomattavasti, koska kuivausilma- ja poistoilmaharjat ovat päällekkäin. Tämän takia vilja ei sekoitu samalla tavalla, kuin eräkuivurin kennorakenteessa. Eikä kosteaa viljaa kierrätetä kuivurissa prosessin aikana. (Ahokas. J., ym. 2011, ja Peltola 1997).

### **2.2.4 Kuivuriuunit**

Suomessa kuivuriuuneissa käytetään lähes yksinomaan suoraa ilmalämmitystä. Keskuslämmityskattilassa välitysaineena on yleensä vesi. Käytettäessä suoraa

ilmalämmitystä kattilan rakenne saadaan yksinkertaiseksi ja se on edullinen valmistaa. Myöskään jäätymisriskiä ei ole. Pääpiirteittäin kuivuriuuni koostuu samoista osista, kuin keskuslämmityskattila. Rakenne koostuu erillisestä tulipesästä sekä lämmönvaihtimesta (tuubisto), kuva 4. Puhaltimen avulla kuivausilma puhalletaan tulipesän ja lämmönvaihtimen kautta kuivuriin. Tulipesän ja lämmönvaihtimen pinnoilla oleva lämpöenergia siirtyy kuivausilmaan, ja ilma lämpenee. Kuivuriuunien hyötysuhteet ovat erittäin hyviä. Valmistajat lupaavat kuivuriuuneille parhaimmillaan jopa 95 % hyötysuhdetta. (Jukka Ahokas, Mikko Hautala 2011, Antti Teollisuus -esite)



Kuva 4. Kuivuriuunin rakenne (Esite, Antti Teollisuus 2005)

Öljypolttimella varustetun kuivuriuunin tehoa voidaan säätää joko öljypolttimen suuttimien kokoa vaihtamalla tai polttimeen syötettävän öljyn painetta muuttamalla. Nykyajan kuivuriuunien öljypolttimen ovat varustettu kahdella suuttimella, jolloin kuivauslämpötila pystytään pitämään tasaisena, vaikka imuilman lämpötila vaihtelee. Toisen suuttimen käyttöä säädetään termostaatilla. Uuni voi myös toimia myös kiinteällä polttoaineella. Kiinteää polttoainetta syötetään kuljettimella tulipesään (stokeri). Tulipesässä toimii palopää, jonka toimintaperiaate on saman kaltainen öljypolttimen kanssa.

### 3 TUTKIMUKSEN TAVOITTEET

Tämän tutkimuksen tavoitteena on tehdä simulointityökalu. Simulointityökalun tarkoituksena on toimia apuvälineenä, kun tilalle ollaan suunnittelemassa kuivuri-investointia. Simulaattorilla on voitava määritellä tarvittava kuivurin koko ja uunin teho kyseessä olevan tilan tarpeisiin. Kuivurin kokoa määrittävät tekijät ovat tilan kokonaissato sekä kuivatuspäivien määrä. kokonaissatoon vaikuttaa moni asia, mutta kuivatuspäivien määrä on sidoksissa puintipäivien määrään. Suomessa hyviä puintipäiviä on keskimäärin vain 16 päivää.

Simulointityökalun on rakennettava niin, että se on helppokäyttöinen ja sitä voidaan käyttää MS Officen Excel –taulukkolaskentaohjelmalla. Simulointityökalun tulosten on pysyttävä 30 prosentin haarukassa todellisista arvoista. Tarvittavat makrot ja ohjelmoinnit tehdään ohjelmistossa olevan VBA (Visual Basic) -sovelluksen avulla. Myös simulointityökalun ulkoasuun ja käyttöliittymään on kiinnitettävä huomiota. Sen pitää olla selkeä ja helppokäyttöinen.



## **4 AINEISTO JA MENETELMÄT**

### **4.1 Tutkimuksen esittely**

Tutkimuksen tarkoituksena oli kehittää helppokäyttöinen simulointityökalu tilalla tarvittavan kuivaamon koon sekä tarvittavan lämpökattilan tehon määrittämiseen. Työkalu oli oltava mahdollisimman helppokäyttöinen ja sitä oli mahdollista käyttää tavanomaisilla PC:n toimisto-ohjelmistoilla. Työkalun rakennuslaskentaohjelma valittiin MS Officen Excel taulukkolaskentaohjelma.

Tarvittavan kuivurikoon määrittämiseksi tilalta saatavat määreet ovat tilan kokonaissato sekä kuivaukseen käytettävä aika. Muut tarvittavat määreet saadaan laitetoimittajien teknisistä tiedoista. Tuloksena ohjelman pitää tuottaa ainakin kuivurisiilon kokonaistilavuus, tarvittava uunin teho, kuivaamiseen menevä aika halutulla loppukosteuden arvolla.

Simulointityökalun rakentamisessa hyödynnetään veden haihduttamiseen jyvistä kuvaavia matemaattisia kaavoja sekä Mollierin kaaviosta johdettua matemaattista mallia adiabaattilämpötilan laskemiseksi. Tämä pohjautuu Dosentti Mikko Hautalan kehittämään matemaattiseen malliin. Simulaattorin tulosten poikkeama mitattuihin tuloksiin oli mahdollista  $\pm 30 \%$  vaihteluvälin sisälle.

Tarvittavan lämmityskattilan koon määrittämiseksi lasketaan teho kuivausilmamäärän ja alkulämpötilan ja kuivausilman lämpötilan erotuksesta, jotka molemmat lähtöarvot ovat helposti löydettävissä.

### **4.2 Simulaattorin toimintaperiaate**

Simulaattorin toimintaperiaate perustuu veden höyrytämiseen jyvistä. Höyrytämiseen tarvittava lämpöenergia saadaan viljamassan läpi virtaavasta ilmasta. Veden höyrytämiseen tarvittava energia saadaan kaavasta

$$\Delta Q = m_v * l_h \quad (1)$$

Jossa  $m_v$  on höyrystettävän vesimäärän massa (kg) ja  $l_h$  veden höyrystymislämpö, eli 2500kJ/kg. Jos läpi virtaavan ilman massa on  $m_i$  ja sen ominaislämpökapasiteetti  $c_i$  ja ilma jäähtyy  $\Delta T$  määrän, vapautuu lämpöä

$$\Delta Q = m_i * c_i * \Delta T = q_v * \Delta t * \rho_i * c_i * \Delta T \quad (2)$$

jossa  $q_v$  on tilavuusvirta ( $m^3/s$ ), ilman virtausaika  $\Delta t$  sekä ilman tiheys  $\rho_i$ . Simulointiin tarvittava kaava saadaan yhdistämällä kaavat, joka on

$$T(i, j + 1) = T(i, j) - \Delta T, \Delta T = \frac{m_v * l_h}{q_v * \Delta t * \rho_i * c_i} \quad (3)$$

kaavassa  $j$  tarkoittaa viljakerrosta. Viljakerros on jaettu osakerroksiin paksuudeltaan  $dx$ . Koko kerroksen paksuus ( $j$ ) on näin ollen kerrosten määrä  $* dx$ . Indeksillä  $i$  tarkoitetaan ajan hetkeä  $i$ . Simuloinnin koko on koko aika, joka jaetaan aikaväleihin  $dt$ . Näin ollen suurin  $i$ :n arvo on simuloinnissa  $i_{max} = \text{koko aika} / dt$

Simulointi etenee näin:

for  $i=1$  to  $max$

for  $j=1$  to kerroksia

lasketaan viljakerroksen  $j$  kuivuminen ajassa  $dt$  hetkellä  $i$ : aika on

silloin  $i * dt$

next  $j$

next  $i$

□

Viljan kuivumisesta varten tarvitaan myös kaava, josta nähdään kuinka paljon viljan kosteus ( $w$ ) muuttuu ajassa  $dt$ , kun kuivattavan ilman kosteus on  $RH$  sekä lämpötila  $T$ .

$$w(t) = w_e + (w_i - w_e) * \exp(-k * t), \text{ missä} \quad (4)$$

$$k = \exp(20,95 - 6942 / T_s(k)). \quad (5)$$

Kaavassa  $w_i$  on viljan kosteus ajan hetkellä  $t=0$  ja hetkellä  $t$   $w(t)$  j.  $w_e$  on tasapainokosteus vallitsevissa olosuhteissa, joka saadaan kaavasta

$$w_e = \ln(1 - RH/100) / (-D_2 * (+D_4))^{(1/D_3)/100}, \text{missä} \quad (6)$$

$$D_2 = 0,0000229$$

$$D_3 = 2,0123$$

$$D_4 = 195,267.$$

Tämän jälkeen voimme laskea kosteuden muutoksen hetkellä  $i$  kerroksessa  $j$  ajassa  $dt$ :

$$k = \text{Exp}(20,95 - 6942/(T(i-1, j) + 273))$$

$$w_e = (\text{Log}(1 - HR(i, j)/100) / (-D_2 * (T(i-1, j) + D_4)))^{(1/D_3)/100} \quad (7)$$

Lopuksi on vielä selvitettävä, viljakerrokseen tulevan ilman kosteus (RH) ja lämpötila (T). Ilman kulkiessa viljakerrosten läpi kosteus ja lämpötila muuttuvat koko ajan. Eli kerrosten läpi kulkevan ilman kosteus nousee ja lämpötila laskee. Sekä kosteudella (RH, suhteellinen kosteus), että lämpötilalla on raja-arvot. Kosteus RH voi maksimissaan olla 100 %. Lämpötilan raja-arvo saadaan Mollierin diagrammista. Simulaatio-ohjelman tekemisessä ensimmäinen asia on tehdä ohjelma edellä mainitun lämpötilan laskeminen. Ohjelmoinnista haasteellisen tekee se, että Mollierin diagrammissa kyseisen arvon ilmoittava käyrä ( $p_{kyl}(T)$ ) on saatu mittaamalla. Näin ollen sitä voidaan ratkaista analyyttisesti. Tässä ongelma on ratkaistu niin, että lämpötilat käydään läpi (Tapu) aste kerrallaan, alkaen alkulämpötilasta ( $T_s$ ). Jokaiselle lasketaan Tapu  $p_{kyl}(\text{Tapu})$  ja sitä vastaava kylläisen vesihöyryn paine ( $x_s$ ). tästä tarkistetaan, tuleeko oikea kulmakero, joka on luokkaa 2500. Sadut arvot sijoitetaan Ohjelmaan.

#### 4.2.1 Adiabaattilämpötilan laskeminen -ohjelma

Adiabaattilämpötilan lämpötilan laskemiseksi tarvittava ohjelma on esitetty liitteessä 1. Ohjelmoinnissa on käytetty MS Excel -taulukkolaskentaohjelmaan liitettävää Visual Basic for Applications -ohjelmointisovellusta. Ohjelmassa olevat

heittomerkillä alkavat tai sillä jatkuvat merkkirivit eivät vaikuta ohjelman toimintaan. Kyseessä on joko selventävä kommentti tai sivuun laitettu käskyrivi

Ohjelmassa prosessi etenee seuraavasti.  $i_{\max}=35$  ja kerrosmäärien väli on  $\text{for } j = 11 \text{ to } 35$ . Seuraavana on määritelty Excel taulukon solut, joihin laskennassa tarvittavat arvot sijoitetaan. Arvot  $A(a)$ , , ,  $G$  Mollier taulukosta mekaanisesti laskettuja apuarvoja(Tapu). Heittomerkin takana on kuvattu missä muodossa vaadittava arvo on sijoitettava soluun, jotta ohjelma voi prosessoida arvoa. Eli yllä olevan ohjelman avulla voidaan laskea adiabaattilämpötila (Tadiab) sekä sitä vastaava vesihöyryn paine, kun ilman suhteellinen kosteus on saavuttanut 100 % (RH=100).

#### 4.2.2 Kuivausohjelma

kuivausohjelman koodi on esitetty kokonaisuudessaan liitteessä 2. Koodi esittää tavanomaista kennokuivurin (eräkuivuri) rakennetta, joka rakentuu valitusta määrästä kuivauskennoja sekä varastokennoja. Lisäksi rakenteeseen kuuluu halutun kokoinen energialähde, ilman puhallin. Syöttölaite ja elevaattori eivät ole mukana, koska voidaan valita riittävän tehokkaiksi kennostojen koon perusteella valmistajan ilmoittamilla tiedoilla. Komentorivin

Alkuun on määritelty prosessin maksimiaika sekä aika-askel, joiden avulla voidaan laskea  $i_{\max}$ . Lisäksi on annettu  $dx$  eli yhden viljakerroksen paksuus metreissä. Seuraavaksi on määritelty solut, joihin tarvittavat alkuarvot sijoitetaan. Näitä ovat:

- viljakerroksen paksuus (paksuus)
- hehtolitraino (hehtolp)
- kuivauskennon tilavuus (elementtikoko)
- kuivauskennojen määrä (kpl)
- Varastosiilojen tilavuus
- varastosiilojen määrä (kpl)
- kannen ja jalustan tilavuus

Tämän jälkeen koodaamista on jatkettu tarvittavien laskutoimitusten osalta. Ohjelman pääperiaate on seuraava. Ohjelmaan syötetään edellä mainitut alkuarvot. Tämän lisäksi koodin ensimmäisestä osiosta kuivausilman tilavuusvirta, ilmankosteus, sekä viljan kosteus. Lisäksi määritellään tavoitekosteus. Alkuarvojen perusteella ohjelmalla pystytään laskemaan kuivattavan viljamäärän tarvittavan vesimäärän poistamiseen tarvittava aika. Ohjelmaan on tehty luuppi käsky, joka "kierrättää" laskentaa ennalta määrätyn aika-askeleen mukaan ( $dt = 0,03$ ). Tämä toistuu niin monta kerta, kunnes valittu tavoitekosteus on saavutettu. Viljan kuivuminen, kuten aikaisemmin on mainittu, tapahtuu ilman siirtymällä osakerrokselta 1 osakerrokselle 2 ja niin edelleen. Ilman siirtyessä kerrokselta toiselle ilma jäähtyy ja ilman suhteellinen kosteus lisääntyy. Tämä aiheuttaa sen, että eri kerroksien viljan kosteudet ovat keskenään erilaiset. Toisin sanoen ilman kulkusuunnasta katsottuna seuraavan kerroksen viljan kosteus on suurempi. Tämä ohjelma on tehty niin, että, jokaisen aika-askeleen jälkeen, kuivattava vilja sekoittuu niin, että seuraavan aika-askeleen alkaessa eri osakerroksien viljalla ei ole kosteuseroa. yksinkertaistaa huomattavasti ohjelmointia, mutta ei muuta lopputulosta. Tämä myös osittain myös tapahtuu kuivurissa, viljamassan ollessa jatkuvassa liikkeessä. Joka tapauksessa vettä poistuu viljasta sama määrä.

Viljakerroksen paksuus määräytyy kuivauskennon korkeudesta. Tämä jaetaan neljällä (4), koska markkinoilla olevissa kuivurien kuivauskennoissa on ilman tuloon ja poistoon ilmaharjoja kummallekin neljässä kerroksessa. Viljakerroksen massa niin ikään määritellään

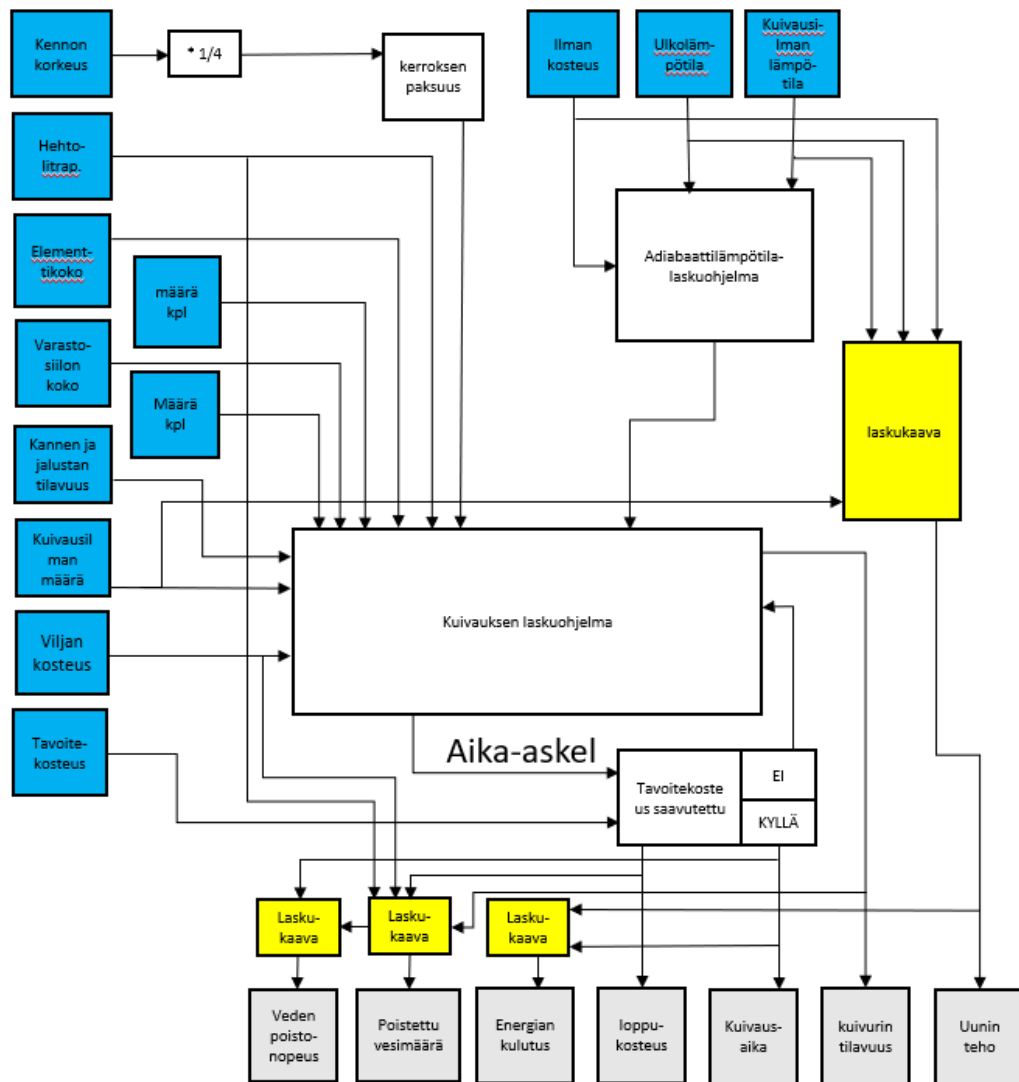
$$\text{Kennon tilavuus} * \text{hehtolitrapaino} * 10 / 4 \quad (8)$$

Lausekkeessa on kerron 10, jotta lauseke laskee massa kilogrammoina (Kg). Jakaminen neljällä (4) lopputulos ilmoittaa yhden kerroksen viljamassan kuivauskennossa. Kokonaismassa kuivausprosessissa olevalle viljalle saadaan kaavan vastaus kuivauskennojen lukumäärällä ja vielä kertomalla se yhdessä kennossa olevien kerrosten lukumäärällä, eli luvulla 4. Tällä toimenpiteellä saadaan rakennettua sellainen malli, että lähtöarvoissa olevat määrät voidaan muokata ohjelmalle sopiviksi arvoiksi. Toisin sanoen kuivurin kennoissa

päällekkäin olevat kuivattavat viljakerrokset muutetaan yhdeksi suureksi kerrokseksi, johon mahtuu kaikki kuivausprosessissa oleva viljamassa, jonka läpi puhalletaan tietty määrä ilmaa. Yksinkertaisuudessaan kuivausprosessin aikaan vaikuttaa oleva viljan massa, viljakerroksen paksuus, viljakerroksen pinta-ala sekä ilman määrä ja laatu.

Kuivausprosessissa olevan viljamassan lisäksi kuivurissa on myös viljaa varastosiiloelementeissä. Kuivurin kokonaisviljamäärä on siis huomattavasti suurempi kuin kuivausprosessissa olevan viljan määrä. Tämä pitää ottaa huomioon laskettaessa kuivauksen kokonaisaikaa. Vettä poistetaan osasta viljaa kerrallaan, mutta kosteus lasketaan viljan kokonaismassasta. Kuivauskennojen tilavuuteen lisätään vielä varastokennojen, kuivurin kannen sekä jalustan (syöttölaitteen) tilavuus. Ohjelmassa on määritelty solut, joista tarvittavat arvot sijoitetaan.

Solujen, joihin tarvittavat arvot sijoitetaan, lisäksi on määritelty myös ne solut, joihin saadut tulokset sijoitetaan. Myös haluttujen tulosmatriisien koot on määritelty ohjelmassa. Kuvassa 5. on kaaviolla ohjelman toimintaperiaate.

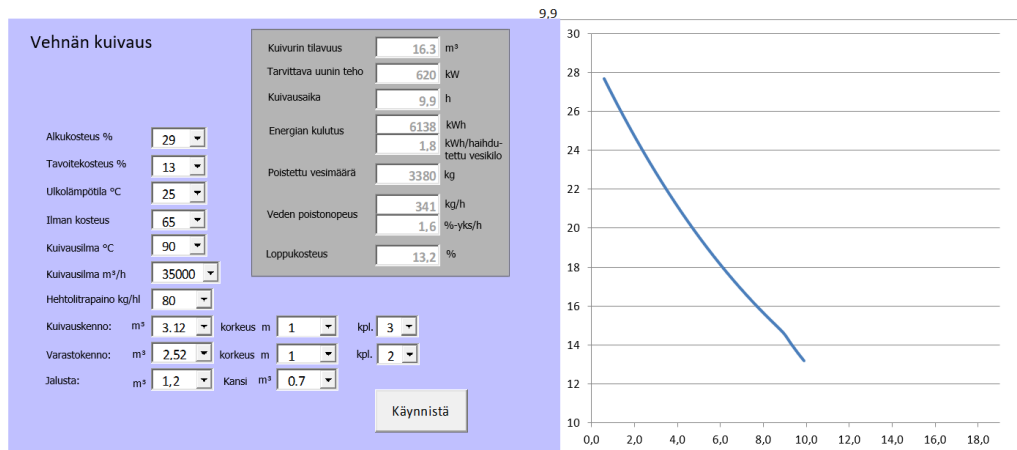


Kuva 5. Ohjelman toimintaperiaate kaavio.

Kaaviossa sinisellä pohjalla olevat laatikot kuvaavat lähtötietoja. Valkoisella pohjalla olevat laatikot kuvaavat laskuohjelmaa. Keltaiset laatikot kuvaavat laskukaavoja, jotka ovat Excel taulukossa, ei laskuohjelmassa.

#### 4.2.3 Käyttöliittymä

Simulaattorin käyttöliittymä, johon tarvittavat arvot voidaan sijoittaa, on rakennettu taulukko -sivun päälle. Käyttöliittymän rakentamisessa on käytetty MS Officen omia kehitystyökaluja, kuten alas vetotaulukoita ja graafisia kuvauksia. Kuvassa 4.2 on esiteltynä simulaattorin graafinen käyttöliittymä.



Kuva 4.1. Simulaattorin graafinen käyttöliittymä.

Sinisellä pohjalla oleviin valkoisiin kenttiin syötetään lähtöarvot. Lähtöarvojen syötön helpottamiseksi kentistä löytyy alas vetovalikot, joista löytyy yleisimmät syötettävät arvot. Kuivurin kokoon liittyvien kenttien kohdalta löytyy yleisimpien kuivurin valmistajien vastaavat arvot. Alas vetovalikot on rakennettu niin, että ne eivät rajoita arvojen määrää. Alas vetovalikkojen sisältämien arvojen lisäksi kenttään voi syöttää minkä tahansa arvon numeronäppäimillä.

Harmaalle pohjalle tulevat ne arvot, jotka simulaattorista laskemisen tuloksena syntyy. Ohjelma on suunniteltu niin, että tarkkuus (desimaalien määrä) on määrätty halutun mukaisesti. Sinisen laatikon yläpuolella, oikeassa reunassa näkyvä luku (9,9) kertoo juoksevan ajan simulaattorin laskiessa arvoja. Juokseva asvo myös ilmaisee sen, että simulaattorin prosessi on käynnissä.

Kuvassa oikealla oleva käyrä kuvaa graafisesti viljan kuivumisen ajan suhteen. Aikaa ilmoittava akseli on rajattu 18 tuntiin, koska suuremmalla tuntimäärällä kuvaaja menisi niin kapeaksi, ettei se enää kerro visuaalisesti oikein mitään. Myös käytännön kannalta yli 18 tunnin kuivausjakso pitkä, ja kertoo kuivurin koon ja lämpötehon epäsuhdasta tai liian suuresta korjuukosteudesta.

#### 4.2.4 Lähtöarvojen käsittely

Kenttiin valittavien arvojen muodot ovat sellaisia, että ne ovat helposti satavilla joko mittaamalla yleisesti käytössä olevilla mittalaitteilla tai löydettävissä



kuivurivalmistajien ilmoittamista teknisistä tiedoista. Osa saaduista tiedoista ei suoraan ole käyttökelpoisia, vaan niitä on muokattava. Osa halutuista tuloksista voitiin laskea suoraan Excel -taulukkoon kirjoitetulla yksinkertaisella kaavalla, (kuva 5. keltainen laatikko). Lisäksi osa ohjelman antamista arvoista oli myös muokattava kaavalla, jotta saatiin tulostaulukkoon lopputulos halutussa muodossa.

Ensimmäiseksi kuivurin tilavuus on saatu kertomalla sekä kuivauskennojen että varastokennojen tilavuudet niiden lukumäärällä ja laskemalla yhteen. tähän summaan lisättiin myös mahdollinen kannen tilavuus sekä jalusta. Myös tarvittava uunin teho voitiin laskea suoraan Excel -taulukossa. Uunin teho saatiin laskettua kaavalla

$$P = V * \Delta T * \rho * c_i / 3600, \text{ jossa} \quad (9)$$

V on kuivausilman määrä (m<sup>3</sup>/h),  $\Delta T$  on alkulämpötilan ja kuivauslämpötilan erotus ja  $\rho$  on ilman tiheys vallitsevissa olosuhteissa (lämmitetty ilma). Lisäksi tarvitaan  $c_i$  ilman ominaislämpökapasiteetti, joka on 1,006 kJ/(K\*kg). Koska kuivausilman määrä ilmoitetaan teknisissä tiedoissa yleensä kuutioita tunnissa, jaetaan lauseke 3600 sekunnilla. Ilman tiheys muuttuu kuivatusilman lämpötilan muuttuessa. Tiheys voitiin laskea kaavalla

$$\rho = M * p / (R * T), \text{ jossa} \quad (10)$$

- M = ilman moolimassa
- p = normaali ilmanpaine
- R = Ilman kaasuvakio
- T = kuivauslämpö muutettuna Kelvineiksi

Sijoittamalla vakiot taulukkoon, ja ottamalla kuivausilman lämpötila lähtötiedoista Kelvineiksi muutettuna, voitiin laskea ilman tiheys  $\rho$ . Sijoittamalla saatu arvo ylempään kaavaan (4.8), saatiin laskettua arvo uunin teholle. Näiden lisäksi energian kulutus, poistettu vesimäärä sekä veden poistonopeus pystyttiin laskemaan Excel -taulukon avulla ihan perusmatematiikalla.

Muokkausta tarvitseva alkuarvo oli kuivausilma. piti jakaa kuivauskerroksen pinta-alalla. Pinta-ala saatiin jakamalla kuivauskennon tilavuus kennon korkeudella. Saatu osamäärä kerrottiin kennossa olevien kerroksien määrällä, eli neljällä (4). Saatu tulo kerrottiin vielä kuivauskennojen määrällä. Tämän laskukaavan tekeminen Excel -taulukkoon saatiin alkuarvo muokattua sopivaan muotoon.

Laskuohjelman luonteen vuoksi myös kuivurin jalustan- sekä mahdollisen kannen tilavuus oli muutettava korkeudeksi. Kannen tilavuus jaettiin varastokennon tilavuudella, jolloin saadaan korkeus, joka vastaa varastosiilon korkeutta suhteessa tilavuuteen. Toisin sanoen se vastaa vajaata varastosiiltoa, jossa on tietty korkeus viljaa. Jalustan tilavuus jaetaan taas kuivauskennon tilavuudella, koska jalusta on rakenteeltaan lähempänä kuivauskennon rakennetta syöttölaitteeseen liittyvien harjojen takia. Muuten periaate on sama, vajaa kenno.

Ohjelma tuottaa taulukkoon matriisia lämpötiloista joka kuivaussyklin jälkeen. Tämä on informaation kannalta jokseenkin huono tapa esittää kuivauksen etenemistä. Matriisia hyödyntäen laadittiin viivakaavio, johon piirtyy käyrä, joka kuvaa kuivausprosessin edistymistä ajan suhteen. Kaaviossa pystyakseli kuvaa viljan kosteutta ja vaaka-akseli kuvaa kuivaukseen käytettyä aikaa.

Lopuksi, kun tarvittavat laskutoimitukset, vakiot ja muut toimenpiteen kannalta tarpeelliset asiat oli syötetty Excel -taulukkoon, työkirjan rakenne suojattiin salasanalla. Tällä estetään se, ettei työkirjaa voida muuttaa vahingossa käytön aikana esimerkiksi virheellisen näppäilyn tuloksena. Samalla varmistetaan, että simulaattori pysyy sellaisena, kuin se on alun perin suunniteltu. Ennen suojaamista taulukon taustaväri, solujen tekstien väri sekä solujen reunat muutettiin saman väriseksi, jolloin kokonaisuudesta saatiin yhtenäinen ja siistin näköinen. Ainoastaan kuivaukseen käytettyä aikaa kuvaava luku jätettiin näkyviin. Kuluvan ajan lisäksi kyseinen luku ilmoittaa simulointiprosessin olevan käynnissä muuttumalla suuremmaksi prosessin edetessä.

## 5 TULOKSET

### 5.1 Simulaattorin käytettävyys

Simulaattorin testauksen ensimmäisenä vaiheena testattiin simulaattorin käytettävyyttä. Eli käytännössä graafisen käyttöliittymän toimivuutta simulointiolosuhteissa. Kaikkien alas vetovalikkojen toiminta tarkastettiin. Lisäksi varmistettiin, että minkä tahansa arvon lisääminen numeronäppäimillä onnistuu. Myös käyttöliittymän selkeyttä arvioitiin silmämääräisesti. Tarkasteltiin, onko liittymässä esiintyvät luvut ja teksti riittävän selkeitä ja onko fonttikoko riittävä. Lisäksi arvioitiin, ovatko tekstien informatiivisuus, riittävällä niin, että jokainen viljan kuivauksesta tietävä ymmärtää, mitä asialla tarkoitetaan. Käytettävyys testattiin käytännön kokeilla, eli simulaattoriin syötettiin arvoja tai haettiin alas vetovalikoista ja käynnistettiin simulointiprosessi. Simuloinnin kestoa mitattiin sekuntikellolla. Simulointiprosessin kesto aika riippui alkukosteuden ja tavoitekosteuden erotuksesta sekä uunin tehosta. Prosessiaikaa testattiin 8 , , , 16 prosenttiyksikön kuivatusvälillä, 170 kW:n teholla, 11000 ilmavirralla. Prosessiaika asettui välille 16 , , , 20 s.

### 5.2 Simulaattoriajo ja tulosten kerääminen

Simulaattoriajo tehtiin kolmen erillisen kuivurin mittaustuloksilla. Simulaattoriin syötettiin lähtötiedot. Simulaattorin antamia tuloksia verrattiin Kuivurista mitattuihin arvoihin. Kuivurin mitat saatiin kuivurin valmistajien esitteestä. Kahden testauksessa käytetyn kuivurin mittauksissa käytettiin erilaisia antureita, jolla voitiin mitata reaaliaikaisesti lähes kaikkia muuttuvia suureita. Kolmannessa kuivurissa mitattavien suureiden kirjo oli suppeampi. Seuraavassa esitellään mittauksessa käytetyt kuivurit sekä mittaus- ja simulaattorin antamat tulokset.

#### 5.2.1 Koetilan kuivuri I

Koetilan kuivaamo on Antti Teollisuuden valmistama, tyyppiltään Agrosec 43MF2. Kuivurissa on 4 kuivauskennoa ja kolme varastosiltoa, yhteistilavuudeltaan 27,4 m<sup>3</sup>. Kuivaamo sijaitsee Helsingin yliopiston Viikin koetilalla. Kuivaamon tarkemmat tekniset tiedot löytyvät liitteestä 3. Lämmitysuunina on Antti Hipress

200, liite 4, jonka nimellisteho on 200 kW. Uunin puhaltimen ilmamäärä valmistajan tietojen mukaan on 15 000 m<sup>3</sup>/h. Uuni toimii maakaasulla.

Mittaustulokset saatiin mittaamalla jokainen kuivauserän kosteus käsin kuivausmittarilla ennen kuivausta. Viljaerän paino mitattiin ennen kuivausta ja kuivauksen jälkeen. Kuivauslämpötilan kohdalla mittaustiedoissa oli käytettävissä mittausdataa kahden minuutin välein kahdella eri anturilla koko kuivausprosessin ajalta. Sama oli tilanne myös ilman suhteellisen kosteuden kanssa, kuin ulkolämpötilan kohdalla. Simulointia suoritettaessa käytettiin arvoina lukujen keskiarvoa. Taulukossa 1 on esitetty Kuivaamo I:n kuivauksesta saadut mittaustulokset.

Taulukko 1. Kuivauksen mittaustulokset kuivaamo I

	laji	alkukosteus %	märkäpaino, kg	loppukosteus %	kuivausaika	Kuivauslämpö	ulkolämpötila	Ilmankosteus
erä 1	Kruunu	24	11700	14	9,7	77	18,1	77
erä 2	Kruunu	21	11900	13,5	8,1	80	20,2	69
erä 3	Kruunu	22	12000	13,2	6,9	77	17,8	86
erä 4	Kruunu	25,3	11700	13,2	10,4	79	18,4	80
erä 5	Kruunu	19	11900	13	7,5	83	21,2	69
erä 6	Tipple	17	11230	12,7	4,7	70	14,8	87
erä 7	Tipple	16	10600	12,5	3,7	74	19,1	76
erä 8	Tipple	15,5	10800	12,9	3,7	71	15,2	95
erä 9	Tipple	19,5	10880	13,1	6,2	75	19,7	79
erä 10	Tipple	18	10500	13	5,2	74	18,5	90

Taulukossa olevat arvot syötettiin simulaattoriin. Kuivauserän märkäpainon ja hehtolitrapainon avulla, joka on Kruunu -vehnälle keskimäärin 75,1 ( <https://boreal.fi/lajikkeet/kruunu/20.10.2020>) ja NFC Tipple -ohrille 67,3 ( <https://www.sgnieminen.fi/wp-content/uploads/2015/09/Kaksitahoiset-ohralajikkeet-2016.pdf>), voitiin laskea erän kokonaismäärä kuutiometreinä.

Syöttölaitteen tilavuutta muuttamalla saatiin kuivurin koko vastaamaan viljaerien kuutiomäärää yhden desimaalin tarkkuudella. Taulukossa 2 on esitetty

Simulaatiossa käytetyt lähtöarvot, mittaustulokset sekä simulaattorin antamat arvot. Valmistajan tiedoista poiketen simuloinnissa puhaltimen ilmamääränä käytettiin arvoa 10 000 m<sup>3</sup>/h, joka

Taulukko 2. Simulaattorin tulokset verrattuna kuivuriin 1.

										simulaattorin arvot			
	alkukosteus %	loppukosteus %	ulkolämpötila °C	ilman kosteus %	kuivauslämpö °C	märkäpaino, kg	painonmuutos, kg	määrä m <sup>3</sup>	kuivausaika h	Loppukosteus %	kuivausaika h	poistettu vesi kg	uunin teho kW
erä 1	24	14	18	77	77	11700	700	15,6	9,7	14	11,7	1400	180
erä 2	21	13,5	20	69	80	11900	900	15,9	8,1	13,4	9,6	1030	170
erä 3	22	13,2	18	86	77	12000	700	16,0	6,9	13,3	11,4	1230	150
erä 4	25,3	13,2	18	80	79	11700	1300	15,6	10,4	13,2	14,1	1600	170
erä 5	19	13	21	69	83	11900	1000	15,9	7,5	12,8	7,5	830	170
erä 6	17	12,7	15	87	70	11230	390	16,64	4,7	12,6	5,7	580	160
erä 7	16	12,5	19	76	74	10600	250	15,8	3,7	12,5	4,2	430	160
erä 8	15,5	12,9	15	95	71	10800	310	16,0	3,7	12,9	3	330	160
erä 9	19,5	13,1	20	79	75	10880	680	16,2	6,2	13,1	7,5	800	160
erä 10	18	13	18	91	74	10500	630	15,6	5,2	12,9	6	630	160

Loppukosteuden ja kuivausajan lisäksi taulukosta käy ilmi myös poistettu vesimäärä. Kuivauserien mittauksissa saatu arvo (painon muutos) sisältää veden lisäksi myös esipuhdistuksessa poistuneiden epäpuhtauksien painon. Energian kulutus selvyiden vuoksi esitetty omassa taulukossa. Kohdekuivurin energian kulutus on laskettu kuivurin käyttämän polttoaineen lämpöarvosta. Kuivurin energian kulutus on laskettu kaavalla

$$E = H * V, \text{ jossa} \quad (11)$$

- H = polttoaineen lämpöarvo (MJ/m<sup>3</sup>)
- V = käytetyn polttoaineen määrä kuutiometreinä

Laskukaava antaa käytetyn energian määrän megajouleina (MJ). Arvo saadaan muutettua kilowattitunneiksi (kWh) jakamalla saatu arvo 3,6:lla. Taulukossa 3 on esitetty kuivurin käyttämä energian kulutus polttoaineen kulutuksen perusteella sekä simulaattorin antama energian kulutus. Koekuivurin uunin teho saatiin jakamalla energiamäärä kuivaukseen käytetyillä tunneilla.

Taulukko 3. Kuivuri I:n energian kulutus

koekuivuri						simulaattori	
	käytetty kaasu- määrä		35,6	uunin teho			kuivaus- aika
	m <sup>3</sup>	MJ/m <sup>3</sup>	kWh	kw	kwh	kw	h
erä 1	209	7440,4	2066,8	213	1746	180	9,7
erä 2	209	7440,4	2066,8	255	1581	170	8,1
erä 3	144	5126,4	1424,0	206	1620	150	6,9
erä 4	163	5802,8	1611,9	155	2295	170	10,4
erä 5	212	7547,2	2096,4	280	1275	170	7,5
erä 6	99	3524,4	979,0	208	912	160	4,7
erä 7	77	2741,2	761,4	206	672	160	3,7
erä 8	78	2776,8	771,3	208	528	160	3,7
erä 9	128	4556,8	1265,8	204	1200	160	6,2
erä 10	108	3844,8	1068,0	205	960	160	5,2

Energian laskemisessa maakaasun lämpöarvona käytettiin 35,6 MJ/m<sup>3</sup> ([www.motiva.fi](http://www.motiva.fi) 20.10.2020). Tulosten perusteella päätettiin laskea kuivausaika vielä energian kulutuksesta lasketun tehon sekä valmistajan ilmoittaman tehon mukaan. Polttoaineen kulutuksen perusteella lasketun tehosta vähennettiin 8 % uunin hyötysuhteen mukaisesti. Teho saatiin halutun suuruiseksi ilmamäärää muuttamalla. Lisäksi laskettiin vielä kuivausaika ja tehon tarve uunin valmistajan ilmoittamalla teholla (200 kW) ja ilmamäärällä (15 000 m<sup>3</sup>/h). Taulukossa 4 on esitetty simulaattorin antamat tulokset eri laskentavaihtoehdoille.

Taulukko 4. Kuivausaika ja ilmamäärä tehon perusteella

	laskettu teho					valmistajan ilmoittama				15 000m <sup>3</sup> /h		
	kW	kW-8%	m <sup>3</sup>	h	%	kW	m <sup>3</sup>	h	%	kW	h	%
erä 1	213	196	11800	9,3	14	200	12050	9,3	14	250	7,5	14
erä 2	255	235	14050	6,3	13,6	200	11940	7,8	13,5	250	6	13,4
erä 3	206	190	11450	9,6	13,3	200	12400	8,7	13,3	249	7,2	13,2
erä 4	155	143	8400	16,2	13,1	200	11730	12,3	13,3	256	9	13,4
erä 5	280	257	14900	4,8	13	200	11650	6,3	13,1	258	4,8	13
erä 6	208	192	12150	4,5	12,7	200	12650	4,5	12,6	237	3	12,6
erä 7	206	189	12700	3,3	12,6	200	12800	3,3	12,5	243	2,7	12,6
erä 8	208	192	11950	2,7	13	200	12450	2,7	12,8	240	2,4	12,7
erä 9	204	188	12050	6,3	13	200	12850	5,7	13,2	234	5,1	12,9
erä 10	205	189	11900	4,8	13	200	12600	4,5	13,1	238	3,9	13

Laskettujen arvojen perusteella laskettiin poikkeama mitattujen arvojen sekä simulaattorin antamien arvojen välillä. Taulukossa 5 on esitelty prosentuaaliset poikkeamat. Mittausarvon tehona on käytetty kulutetun polttoaineen lämpöarvosta laskettua tehoa korjattuna valmistajan ilmoittamalla uunin hyötysuhteella. Mittausarvoissa poistetun vesikilon määränä on käytetty mitatun lähtöpainon ja loppupainon erotusta.

Taulukko 5. Simulaattorista saatujen arvojen prosentuaalinen poikkeama

Simulaattori																			
mitatut arvot					ilmamäärä 10 000 m³/H										ilmamäärä 15 000 m³/H				
	kuivaus- aika	teho kW	pois- tettu vesi kg	vesi kg/h	kuivaus- aika	teho kW	pois- tettu vesi kg	vesi kg/h		kuivaus- aika	teho kW	pois- tettu vesi kg	vesi kg/h		kuivaus- aika	teho kW	pois- tettu vesi kg	vesi kg/h	
					%	%	%	%							%	%	%	%	
erä 1	9,7	196	700	72	11,7	20	180	-8	1400	100	120	66	7,5	-23	250	28	1400	100	187
erä 2	8,1	235	900	111	9,6	19	170	-28	1030	14	107	-3	6	-26	250	6	1030	14	172
erä 3	6,9	190	700	101	11,4	65	150	-21	1230	76	108	6	7,2	4	249	31	1230	76	171
erä 4	10,4	143	1300	125	14,1	36	170	19	1600	23	113	-9	9	-13	256	80	1600	23	178
erä 5	7,5	257	1000	133	7,5	0	170	-34	830	-17	111	-17	4,8	-36	258	0	830	-17	173
erä 6	4,7	192	390	82	5,7	21	160	-17	580	49	102	23	3	-37	237	24	580	49	193
erä 7	3,7	189	250	68	4,2	14	160	-15	430	72	102	52	2,7	-27	243	28	430	72	159
erä 8	3,7	192	310	84	3,0	-19	160	-17	330	6	110	31	2,4	-35	240	25	330	6	138
erä 9	6,2	188	680	110	7,5	21	160	-15	800	18	107	-3	5,1	-18	234	25	800	18	157
erä 10	5,2	189	630	121	6,0	15	160	-15	630	0	105	-13	3,9	-25	238	26	630	0	162
Simulaattori 4,5																			
Teho polttoaineen kulutus, 92% hyötysuhde										Teho 200 kW									
					kuivaus- aika	teho kW	pois- tettu vesi kg	vesi kg/h		kuivaus- aika	teho kW	pois- tettu vesi kg	vesi kg/h						
					%	%	%	%		%	%	%	%				%	%	
				erä 1	9,3	-4	196	0	1400	100	151	109	9,3	-4	200	2	1400	100	151
				erä 2	6,3	-22	235	0	1030	14	163	47	7,8	-4	200	-15	1030	14	132
				erä 3	9,6	39	190	0	1230	76	128	26	8,7	26	200	5	1230	76	141
				erä 4	16,2	56	143	0	1600	23	99	-21	12,3	18	200	40	1600	23	130
				erä 5	4,8	-36	257	0	830	-17	173	30	6,3	-16	200	-22	830	-17	132
				erä 6	4,5	-5	192	0	580	49	129	56	4,5	-5	200	4	580	49	129
				erä 7	3,3	-11	189	0	430	72	130	93	3,3	-11	200	6	430	72	130
				erä 8	2,7	-27	192	0	330	6	122	46	2,7	-27	200	4	330	6	122
				erä 9	6,3	2	188	0	800	18	127	16	5,7	-8	200	6	800	18	140
				erä 10	4,8	-8	189	0	630	0	131	8	4,5	-13	200	6	630	0	140

### 5.2.2 Koetilan kuivuri II

Kyseinen kuivuri on koneistoltaan identtinen koetilan kuivurin I:n kanssa. Kuivuri II poikkeaa I:stä siinä, että kuivaussiilo on eristetty. Kuivuri II:n koossa voitiin käyttää samoja arvoja kuin kuivuri I:ssä. Taulukossa 6 on esitetty kuivuri II:sta mittaamalla saadut arvot. Taulukosta näkee myös poistunut veden määrä.

Taulukko 6. Kuivauksen mittaustulokset kuivuri II.

	laji	alkukosteus %	märkätaino, kg	kuiva-paino, kg	loppukosteus %	kuivausaika h	Kuivauslämpö °C	ulkolämpötila	ilman kosteus
erä 1	Kruunu	24	11800	11000	13,6	9,6	76	19	78
erä 2	Kruunu	21	11900	11000	13,6	8,1	78	21	65
erä 3	Kruunu	22	12000	11300	13,2	6,9	75	18	72
erä 4	Kruunu	22	11700	11000	13,3	9,7	77	18	86
erä 5	Kruunu	22	11700		13	6,5	80	20	81
erä 6	Tipple	17	11830	11510	13	3,7	77	22	58
erä 7	Tipple	15	11800	11440	13,5	3,7	89	15	98
erä 8	Tipple	17	11700	11450	12,3	3,9	73	19	88
erä 9	Tipple	15,5	11500	11370	12,9	3,4	69	16	63
erä 10	Tipple	19,5	11700	11100	13,7	5,1	74	20	87

Kuivurin II:n energian kulutus laskettiin kulutetun polttoaineen perusteella. Koetilan kuivuri II:n käyttämän energian arvot ovat laskettu samalla periaatteella, kuin kuivuri I:ssä. Lisäksi taulukkoon laskettiin teho myös hyötysuhteen mukaan. Taulukossa 7 on esitetty kulutuksen perusteella lasketut arvot.

Taulukko 7. Kuivuri II:n energian kulutus

	kulutettu polttoaine			uunin teho	
	m <sup>3</sup>	MJ/m <sup>3</sup>	kWh	kw	kW 92%
erä 1	182	6479,2	1800	187	172
erä 2	156	5553,6	1543	190	175
erä 3	134	4770,4	1325	192	177
erä 4	188	6692,8	1859	192	176
erä 5	125	4450	1236	190	175
erä 6	71	2527,6	702	190	175
erä 7	71	2527,6	702	190	175
erä 8	74	2634,4	732	188	173
erä 9	65	2314	643	189	174
erä 10	97	3453,2	959	188	173

Saadut arvot syötettiin simulaattoriin samalla periaatteella, kuin kuivuri I:n kohdalla. Taulukossa 8 on esitetty simulaattorilla saadut arvot käytettäessä Kuivuri II:n mittausarvoja ja ilmamäärällä 10 000 m<sup>3</sup>.



Taulukko 8. Simulaattorin antamat tulokset verrattuna kuivuri II mittaamalla saatuihin arvoihin

	alkukosteus %	loppukosteus %	ulkolämpötila °C	ilman kosteus %	kuivauslämpö °C	märkäpaino, kg	painonmuutos, kg	määrä m³	kuivausaika h	simulaattorin arvot			
										Loppukosteus %	kuivausaika h	poistettu vesi kg	Uunin teho kW
erä 1	24	13,6	19	78	76	11800	800	15,7	9,6	13,6	13,6	1420	160
erä 2	21	13,6	21	65	78	11900	900	15,9	8,1	13,6	9,3	1030	160
erä 3	22	13,2	18	72	75	12000	700	16,0	6,9	13,2	10,8	1230	161
erä 4	22	13,3	18	86	77	11700	700	15,6	9,7	13,2	11,4	1170	166
erä 5	22	13	20	81	80	11700	700	15,6	6,5	13,1	11,1	1220	167
erä 6	17	13	22	58	77	11830	320	17,5	3,7	13	4,8	550	154
erä 7	15	13,5	15	98	89	11800	360	17,5	3,7	12,9	2,1	220	200
erä 8	17	12,3	19	88	73	11700	250	17,4	3,9	12,2	6,3	640	153
erä 9	15,5	12,9	16	63	69	11500	130	17,1	3,4	12,8	3,6	370	153
erä 10	19,5	13,7	20	87	74	11700	600	17,4	5,1	13,6	8,1	810	153

Taulukossa 9 on esitetty simulaattorilla saadut arvot käytettäessä polttoaineen kulutuksesta laskettu teho korjattuna valmistajan ilmoittamalla hyötysuhteella, valmistajan ilmoittamalla teholla sekä valmistajan ilmoittamalla ilmamäärällä.

Taulukko 9. Simulaattorin antamat valmistajan arvoilla sekä polttoaineen kulutuksen perusteella

	laskettu teho					valmistajan ilmoittama				15 000m³/h		
	kW	kW 92%	m³	h	%	kW	m³	h	%	kW	h	%
erä 1	187	172	10700	11,4	13,6	200	12450	9,9	13,5	240	8,1	13,6
erä 2	190	175	10950	8,4	13,5	200	12500	7,2	13,5	240	5,7	13,7
erä 3	192	177	10950	10,2	13,1	200	12400	8,7	13,1	243	6,9	13,4
erä 4	192	176	10600	10,5	13,3	200	12050	9	13,2	249	6,9	13,4
erä 5	190	175	10450	10,8	12,9	200	11950	9,3	13	251	6,9	13,2
erä 6	190	175	11300	4,2	13	200	12950	3,6	13	232	3,3	12,8
erä 7	190	175	8700	2,1	13,4	200	9900	1,8	13,5	302	1,2	13,5
erä 8	188	173	11400	5,4	12,3	200	13000	4,8	12,3	321	4,2	12,3
erä 9	189	174	11450	3	12,9	200	13100	2,7	12,9	229	2,4	12,9
erä 10	188	173	11300	6,9	13,6	200	13050	6	13,6	230	5,1	13,6

Laskettujen arvojen perusteella laskettiin vielä prosentuaaliset poikkeamat mitattujen arvojen sekä simulaattorin antamien tulosten välillä. Taulukossa 10 on esitelty prosentuaalinen poikkeama eri arvoille.

Taulukko 10. Simulaattorista saatujen arvojen prosentuaalinen poikkeama  
kuivuri II

Simulaattori																						
mitatut arvot					imamäärä 10 000 m³/H										imamäärä 15 000 m³/H							
	kuivaus- aika	teho kW	pois- tettu vesi kg	vesi kg/h	kuivaus- aika	teho kW	pois- tettu vesi kg	vesi kg/h					kuivaus- aika	teho kW	pois- tettu vesi kg	vesi kg/h						
					%	%	%	%						%	%	%	%					
erä 1	9,6	172	800	83	13,6	42	160	-7	1420	78	104	25	8,1	-16	240	39	1420	78	175	110		
erä 2	8,1	175	900	111	9,3	15	160	-9	1030	14	111	0	5,7	-30	240	37	1030	14	181	63		
erä 3	6,9	177	700	101	10,8	57	161	-9	1230	76	114	12	6,9	0	243	38	1230	76	178	76		
erä 4	9,7	176	700	72	11,4	18	166	-6	1170	67	103	42	6,9	-29	249	41	1170	67	170	135		
erä 5	6,5	175	700	108	11,1	71	167	-5	1220	74	110	2	6,9	6	251	43	1220	74	177	64		
erä 6	3,7	175	320	86	4,8	30	154	-12	550	72	115	32	3,3	-11	232	33	550	72	167	93		
erä 7	3,7	175	360	97	2,1	-43	200	15	220	-39	105	8	1,2	-68	302	73	220	-39	183	88		
erä 8	3,9	173	250	64	6,3	62	153	-11	640	156	102	58	4,2	8	321	86	640	156	152	138		
erä 9	3,4	174	130	38	3,6	6	153	-12	370	185	103	169	2,4	-29	229	32	370	185	154	303		
erä 10	5,1	173	600	118	8,1	59	153	-12	810	35	100	-15	5,1	0	230	33	810	35	159	35		
174					Simulaattori																	
					Teho polttoaineen kulutus, 92% hyötysuhde										Teho 200 kW							
	kuivaus- aika	teho kW	pois- tettu vesi kg	vesi kg/h									kuivaus- aika	teho kW	pois- tettu vesi kg	vesi kg/h						
					%	%	%	%						%	%	%	%					
	erä 1	11,4	19	172	0	1420	78	125	49				9,9	3	200	16	1420	78	143	72		
	erä 2	8,4	4	175	0	1030	14	123	10				7,2	-11	200	14	1030	14	143	29		
	erä 3	10,2	48	177	0	1230	76	121	19				8,7	26	200	13	1230	76	141	39		
	erä 4	10,5	8	176	0	1170	67	111	54				9	-7	200	13	1170	67	130	80		
	erä 5	10,8	66	175	0	1220	74	113	5				9,3	43	200	14	1220	74	131	22		
	erä 6	4,2	14	175	0	550	72	131	51				3,6	-3	200	15	550	72	153	77		
	erä 7	2,1	-43	175	0	220	-39	105	8				1,8	-51	200	15	220	-39	122	26		
	erä 8	5,4	38	173	0	640	156	119	85				4,8	23	200	16	640	156	133	108		
	erä 9	3	-12	174	0	370	185	123	223				2,7	-21	200	15	370	185	137	258		
	erä 10	6,9	35	173	0	810	35	117	0				6	18	200	16	810	35	135	15		

### 5.2.3 Jaakko kuivuri

Kolmantena simuloitavana kuivurina käytettiin Jaakko Kuivaamo. Kuivaamo on Jaakko -Tehtaiden valmistama, kauppanimeltään Aitta-Jaakko. Kuivurissa on 4 kuivauskennoa ja kolme varastosiiloa, yhteistilavuudeltaan 17,7 m<sup>3</sup> (kannellinen versio) Kuivaamo sijaitsee Iitin Lyötilässä Ruokosen tilalla. Kuivaamon tarkemmat tekniset tiedot löytyvät liitteestä 5. Lämmitysuunina on Jaakko 295, jossa Oilonin valmistama KP-26 H High-low kaksisuutinpoltin, jonka maksiteho on 295 kW. Liitteestä 6 löytyy uunin tarkemmat tekniset tiedot. Uunin puhaltimen ilmamäärä on 16 400 m<sup>3</sup>/h. Uuni käyttää polttoaineena kevyttä polttoöljyä.

Mittaustulokset saatiin mittaamalla jokainen kuivauserän kosteus käsikosteusmittarilla ennen kuivausta. loppukosteus mitattiin myös kuivauksen jälkeen. Kuivauslämpötila säädettiin n. 75 °C, joka tarkistettiin ilmakehässä olevasta mittarista. Ulkolämpötilaa ei oltu mitattu kuivauksen yhteydessä, joten siinä käytettiin alueen keskimääräistä lämpötilaa kyseisenä kuivaus ajankohtana. Kuivaus suoritettiin päivällä. Tämän kuivurin kohdalla käytettävissä oli myös kuivattujen viljaerien hehtolitrapainot. Jaakko kuivurin osalta ei ollut käytössä mittaustulosta painon muutoksesta eikä ilman suhteellisesta kosteudesta. Taulukossa 11 on esitetty Jaakko kuivaamosta saadut mittaustulokset kuivausprosessista.

Taulukko 11. Kuivausprosessin mittaustulokset Jaakko

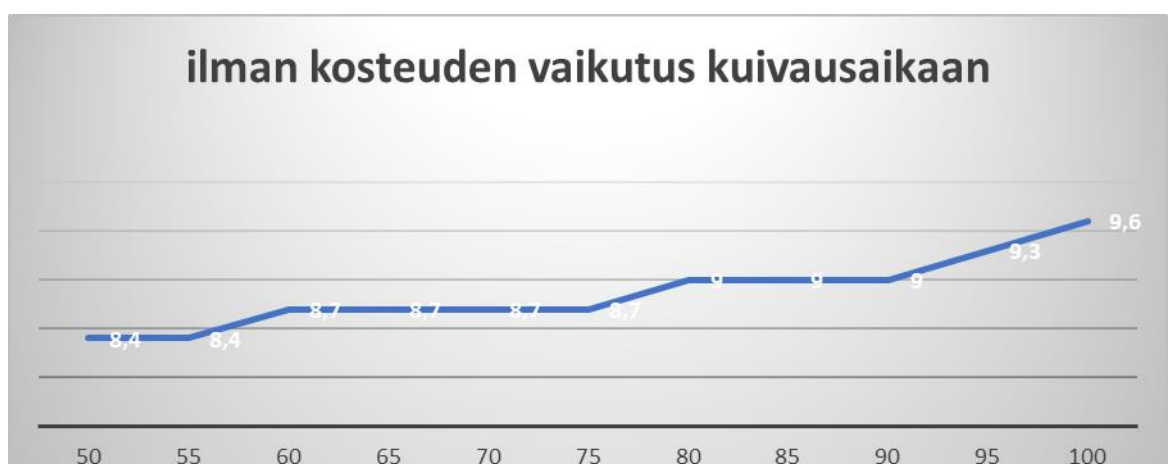
	laji	alkukosteus %	erän koko, m <sup>3</sup>	loppukosteus %	kuivausaika	Kuivauslämpö	ulkolämpötila
erä 1	Demonst.	22,9	17,7	12,3	10	70	17,1
erä 2	Demonst.	24,8	17,7	12,3	9	70	12,1
erä 3	Demonst.	23,7	17,7	12,5	10	70	14,6
erä 4	Demonst.	24	17,7	12,1	9,3	70	13,8
erä 5	Demonst.	26,4	17,7	12,1	10,5	70	9,3
erä 6	Trekker	25	17,7	11,8	7	70	7,1
erä 7	Trekker	23,7	17,7	12,1	7	70	7,6
erä 8	Trekker	22,3	17,7	12,2	7,5	70	7,2
erä 9	Trekker	24	17,7	12,3	8	70	9,3
erä 10	Trekker	24,2	17,7	11,5	7	70	10,7

Jaakon kohdalla ennen varsinaista simulaatiota tehtiin herkkyysanalyysi ulkoilman suhteellisen kosteuden vaikutukselle kuivatusaikaan. Koska ilman suhteellisesta kosteudesta ollut mittausdataa käytössä, haluttiin selvittää sen kokonaisvaikutus lopputulokseen. Taulukossa 12 on esitetty ilman kosteuden vaikutusta kuivausaikaan viiden (5) prosentti yksikön välein.

Taulukko 12. ulkoilman kosteuden vaikutus lopputulokseen.

							simulaattorin arvot	
alkukosteus %	erän koko, m <sup>3</sup>	loppukosteus %	kuivausaika	Kuivauslämpö	ulkolämpötila	ilmankosteus	Loppukosteus	kuivausaika
22,9	17,7	12,3	11,65	65	17,1	50	12,3	8,4
						55	12,2	8,4
						60	12,1	8,7
						65	12,3	8,7
						70	12,2	8,7
						75	12,3	8,7
						80	12,2	9
						85	12,1	9
						90	12,2	9
						95	12,1	9,3
						100	12,2	9,6

Ilmankosteuden vaikutuksesta lopputulokseen saa paremman käsityksen, kun saadut arvot laitetaan viivakaavioon, kuva 6. Viivakaaviosta nähdään, että käyrä on maltillisesti nouseva. Tämä johtuu siitä, että kuivattaessa lämpimällä ilmalla ilmaa kuivataan niin paljon, että ilman alkuperäinen suhteellinen kosteus laskee. Lämmin ilma pystyy sitomaan huomattavasti enemmän vettä ja sen suhteellinen kosteus on pieni verrattuna ilman lähtötilanteeseen ennen lämmittämistä. Alkulämpötilan ollessa alhaisempi kuin esimerkkitapauksessa, käyrän nousutrendi olisi vieläkin loivempi



Kuva 6. Ulkoilman suhteellisen kosteuden vaikutus kuivausaikaan.

Kuvasta nähdään, että kuivausajan nousu ilman suhteellisen kosteuden arvoilla välillä 50 , , , 100 on suhteellisen loiva. ero esimerkkiarvoilla mahtuu 1,2 (1 h, 12

min) tunnin väliin. Keskiarvosta poikkeama on n. 4 %. Välillä 50 , , , 95 % poikkeama keskiarvosta (8,8 h) on vain noin 3 %. Kyseisen ajanjakson suhteellinen kosteus sijoittuu 70 , , ,80 %. väliin, joten laskenta-arvoksi valittiin 77 % Ilman suhteellisen kosteuden vaikutus on pieni ja mahtuu tavoitemarginaalin sisään. Hehtolitrapainot olivat Demonstrant vehnälle 80 kg/100 l ja Trekker ohralle 63,7 kg/100 l. Arvot ovat saatu kuivattujen erien näytteiden analyysistä Taulukossa 13 on estetty Simulaatiossa käytetyt lähtöarvot, sekä simulaattorin antamat tulokset. Tulokset ovat valmistajan ilmoittaman ilmamäärän (16400 m<sup>3</sup>/h), ja maksimitehon mukaan. Mitatun ilmamäärän mukaan ja polttoaineen kulutuksen perusteella ei voitu laskea simulointituloksia, koska mittaustietoa näistä ei ollut käytettävissä Jaakko kuivurin kohdalla. Muut tarvittavat lähtöarvot saatiin mittaustuloksista, taulukko 11.

Taulukko 13. Simulaattorin antamat tulokset verrattuna Jaakko kuivurin tuloksiin

								simulaattorin arvot							
	alku- kos- teus %	loppu- kos- teus %	ulko- läm- pötila °C	ilman kosteus %	kuivaus- lämpö °C	kuivaus- erän koko m <sup>3</sup>	kuiva- usaika h	Loppu- kosteus %	kuiva- usaika h	poistet- tu vesi kg	Uunin teho kW	Loppu- kosteus %	kuiva- usaika h	ilma määrä m <sup>3</sup>	Uunin teho kW
erä 1	22,9	12,3	17	77	75	17,7	10	12,4	10,2	1770	269	12,4	9	18150	298
erä 2	24,8	12,3	12	77	75	17,7	9	12,2	11,4	2080	292	12,4	11,1	16700	298
erä 3	23,7	12,5	15	77	75	17,7	10	12,6	12,6	1870	278	12,6	9,9	17500	298
erä 4	24	12,1	14	77	75	17,7	9,3	12,2	12,2	1960	283	12,3	10,5	17250	298
erä 5	26,4	12,1	9	77	75	17,7	10,5	12	12	2370	307	12,1	13,2	15950	298
erä 6	25	11,8	7	77	75	17,7	7	12	12	1760	316	12	9,9	15450	298
erä 7	23,7	12,1	8	77	75	17,7	7	12,1	12,1	1540	311	12,2	8,7	15700	298
erä 8	22,3	12,2	7	77	75	17,7	7,5	12,3	12,3	1340	315	12,2	7,8	15450	298
erä 9	24	12,3	9	77	75	17,7	8	12,1	12,1	1590	307	12,3	8,7	15950	298
erä 10	24,2	11,5	11	77	75	17,7	7	11,5	11,5	1690	297	11,2	8,1	16450	298

Saatujen arvojen perusteella laskettiin vielä prosentuaaliset poikkeamat mitattujen arvojen sekä simulaattorin antamien arvojen välillä. Taulukossa 14 on esitelty simulaattorilla saatujen arvojen prosentuaaliset poikkeamat mitatuista arvoista.

Taulukko 14. Simulaattorista saatujen arvojen prosentuaalinen poikkeama

Simulaattori																	
mitatut arvot				imamäärä 16 400 m <sup>3</sup> /H						Teho298 kw							
	kuivaus- aika	teho kW	pois- tettu vesi kg	vesi kg/h	kuivaus- aika	teho kW	pois- tettu vesi kg	vesi kg/h		kuivaus- aika	teho kW	pois- tettu vesi kg	vesi kg/h				
					%	%	%	%		%	%	%	%				
erä 1	10,0	298			10,2	269	-10	1770		9	-10	298	0	1770		197	
erä 2	9,0	298			11,4	292	-2	2080		11,1	23	298	0	2080		187	
erä 3	10,0	298			10,8	278	-7	1870		9,9	-1	298	0	1870		189	
erä 4	9,3	298			11,1	283		1960		10,5	13	298	0	1960		187	
erä 5	10,5	298			12,9	307	3	2370		13,2	26	298	0	2370		180	
erä 6	7,0	298			9,3	316	6	1760		9,9	41	298	0	1760		178	
erä 7	7,0	298			8,4	311	4	1540		8,7	24	298	0	1540		177	
erä 8	7,5	298			7,2	315	6	1340		7,8	4	298	0	1340		172	
erä 9	8,0	298			8,4	307	3	1590		8,7	9	298	0	1590		183	
erä 10	7,0	298			8,1	297	0	1690		8,1	16	298	0	1690		209	

Poistetun vesimäärän prosentuaalisia poikkeamia ei voitu laskea, koska veden poistumisesta ei ollut mittaustuloksia.

## 6 TULOSTEN TARKASTELU

### 6.1 Simulaattorin käytettävyys

Simulaattorin käyttöliittymän ja käytettävyyden testauksessa on arvioitu käytön oppimisen helppoutta, tehokkuutta sekä muistamisen helppoutta oletetulta käyttäjäryhmältä. Arviointi perustuu testajan omiin käyttökokemuksiin ja mielipiteisiin. Tieteellistä arviointia sanan varsinaisessa ei simulaattorille ole suoritettu. Oletetun käyttäjäryhmän perusoletuksena on se, että hänellä on peruskäsitys viljan kuivausprosessista lämminilmakuivurilla.

Käytön oppimisen helppoutta testattaessa arvioitiin, kuinka nopeasti uusi käyttäjä pystyy suorittamaan simuloinnin. Käyttöliittymässä on selkeästi laitettu allekkain omaan ryhmään vaadittavat lähtöarvot sekä solut, johon halutut arvot syötetään. Vaadittavat arvot on nimetty helposti ymmärrettäväksi. Kuivurin komponenttien nimeämisissä oli ”hajontaa” eri valmistajien välillä, mutta valitut nimet kuvaavat selkeästi, mikä komponentti on kyseessä. Syöttämistä on helpotettu alas vetovalikoilla. Alas vetovalikot toimivat moitteettomasti. Kritiikkinä voidaan sanoa, että alas vetovalikkojen arvojen vaihteluväli ei kaikissa kohdissa ollut optimaalinen. Esimerkiksi ulkoilmalämpötilan kohdalla alas vetovalikon lämpötila-arvot olivat testaus simuloinnissa liian matalat. Soluihin pystyi syöttämään arvot myös käsin. Se ominaisuus ei kylläkään uudelle käyttäjälle selviä ilman opastusta.

Tehokkuudella arvioitiin nopeutta, millä käyttäjä pystyi suoriutumaan simulointioperaatiosta. Alkuarvojen syöttäminen simulaattoriin onnistui nopeasti, kun tarvittavat tiedot olivat ensin selvitetty. Kuivurin rakenteen tiedot olivat nopeasti löydettävissä eri kuivurien valmistajien tiedoista. Viljan tavoite- ja keskimääräisistä puintikosteuksista (alkukosteus) oli helposti saatavilla tilastotietietoa. ulkolämpötilan ja ilman suhteellisen kosteuden arvon löytäminen olikin haasteellisempaa. Toisaalta ilman suhteellisen kosteuden arvolla oli vähäinen vaikutus lopputuloksen. Ulkolämpötila vaikutti ainoastaan tarvittavaan uunin tehoon, joten kuivauskauden minimilämpötila, joka oli löydettävissä tilastoista. Periaatteessa alin kuivaus ajankohdan lämpötila määrää uunin

minimitehon. Varsinainen simulaattorin prosessi kesti 16 sekunnista 20 sekuntiin riippuen puinti ja kuivauskosteuden erotuksesta. Aikaan saattaa vaikuttaa myös käytettävissä olevan tietokoneen teho. Ohjelman laskutoimituksen ovat sen verran yksinkertaisia, ettei se vaadi suurta laskutehoa.

Muistamisen helppoudella tarkasteltiin, että kuinka helppo on palata käyttämään simulaattoria pitemmänkin tauon jälkeen. Käyttö on erittäin yksinkertainen. ja kaikki tarvittavat toiminnot muistuvat mieleen helposti käyttöliittymästä.

Testauksen yhteydessä tarkasteltiin myös simulaattorin toimivuutta yleisesti. Testauksen aikana simulaattori toimi moitteettomasti. Ohjelma ei kertaakaan jäänyt jumiin tai ”kaatunut”. Toimintavarmuudelta simulaattori vaikuttaa erittäin toimivalta.

## **6.2 Simulaattoriajon tulosten tarkastelu**

Tulosten tarkastelun avulla lähdettiin selvittämään simulaattorin tarkkuutta verrattuna todelliseen kuivausprosessiin. Simulaattorin enimmäispoikkeamaksi sallittiin  $\pm 30 \%$  kuivurin todellisesta kuivausajasta ja tehon tarpeesta. Tulosten tarkastelussa tutkittiin myös poistuneen veden määrää. Mitattujen arvojen kohdalla uunin teho on johdettu mitatusta polttoaineen kulutuksesta

### **6.2.1 Kuivausaika**

Laskettaessa simulaattorilla kuivatusarvoja, simulaattorin antaman kuivausajan välillä oli jossain kohdissa 0,1 prosenttiyksikön ero. Tämä johtui simulaattorin ohjelman rakenteesta. Laskennassa käytettävän ”aika-askel” oli sellainen, ettei se aina osunut kohdalle tavoitekosteuden kanssa. Tämä ero ei kuitenkaan ole tulosten vertailujen kannalta merkittävä. Edellä mainittu 0,1 prosenttiyksikön ero vaikuttaa laskelmien mukaan alle yhden (1) % heiton loppu-aikaan. Prosentuaaliseen poikkeamaan vaikutus oli vieläkin pienempi. Taulukoihin 14 , ,



, 16 on kerätty kunkin kuivurin prosentuaaliset erot lasketuilla ilmamäärän ja uunin tehon arvoilla.

Taulukko 14. Kuivuri I:n prosentuaaliset poikkeamat

	Simulaattori			
	ilmamäärä 10 000 m <sup>3</sup> /H	ilmamäärä 15 000 m <sup>3</sup> /H	Teho polttoaineen kulu- tus, 92% hyötysuhde	Teho 200 kW
	poikkeama%	poikkeama%	poikkeama%	poikkeama%
erä 1	20	-23	-4	-4
erä 2	19	-26	-22	-4
erä 3	65	4	39	26
erä 4	36	-13	56	18
erä 5	0	-36	-36	-16
erä 6	21	-37	-5	-5
erä 7	14	-27	-11	-11
erä 8	-19	-35	-27	-27
erä 9	21	-18	2	-8
erä 10	15	-25	-8	-13

Taulukko 15. Kuivuri II:n prosentuaaliset poikkeamat

	Simulaattori			
	ilmamäärä 10 000 m <sup>3</sup> /H	ilmamäärä 15 000 m <sup>3</sup> /H	Teho polttoaineen kulu- tus, 92% hyötysuhde	Teho 200 kW
	poikkeama%	poikkeama%	poikkeama%	poikkeama%
erä 1	42	-16	19	3
erä 2	15	-30	4	-11
erä 3	57	0	48	26
erä 4	18	-29	8	-7
erä 5	71	6	66	43
erä 6	30	-11	14	-3
erä 7	-43	-68	-43	-51
erä 8	62	8	38	23
erä 9	6	-29	-12	-21
erä 10	59	0	35	18

Taulukko 16. Jaakko kuivurin prosentuaaliset poikkeamat

	ilmamäärä 16 400 m <sup>3</sup> /H	Teho 298 kW
	poikkeama%	poikkeama%
erä 1	2	-10
erä 2	27	23
erä 3	8	-1
erä 4	19	13
erä 5	23	26
erä 6	33	41
erä 7	20	24
erä 8	-4	4
erä 9	5	9
erä 10	16	16

Prosentuaalisia poikkeamia tarkastellessa tuloksissa, jossa on käytetty valmistajan ilmoittamaa ilmamäärää simuloinnissa, 30 eri simuloinnista 5 ylittävät sallitun poikkeaman. Koetilan kuivureista voidaan nähdä selvä trendi, että simulaattorin antama aika on lyhyempi, kuin mittaustuloksissa. Jaakko kuivurissa trendi on päinvastainen. Valmistajan ilmoittamalla teholla simuloitaessa ylittäviä arvoja oli kaksi vähemmän. Sama trendi toistui näissäkin mittauksissa. Koetilan kuivureissa mitatulla ilmamäärällä, sekä polttoaineen kulutuksella lasketun teholla simuloitaessa tuloksista haarukan ulkopuolelle jää lähes puolet.

Tarkasteltaessa tuloksia tehon suhteen, voidaan löytää perustelut Koetilan kuivurien poikkeamista. Taulukkoa 5 tarkastellessa kuivuri I: n osalta, Ilmamäärällä 15 000 m<sup>3</sup> uunin teho on keskimäärin n. 23 % suurempi, kuin uunin nimellisteho. Kuivuri II:lla on samaa luokkaa (taulukko 10), mutta vaihteluväli 15 , , , 60 prosentin välillä. Etenkin kuivuserien 6 , , , 10, joissa kuivausaika on keskimäärin lyhyempi, alle 4 tuntia, on huomattava tehon tarpeen nousu. Verrattuna laskennallisen tehon keskiarvoon, joka on kuivurilla I 197 kW, kuivurilla II 174 kW, ero on vieläkin suurempi. Em. luvuissa on huomioitu uunin hyötysuhde, joka on 92 %. Tämä selittää simuloitaessa lyhyemmän kuivausajan, koska suurempi teho nopeuttaa kuivausprosessia. Myös nimellisteholla simuloitaessa teho on suurempi kuin laskennallinen teho.

Jaakko kuivurilla valmistajan teho ja simulaattorin antamat teholumemat olivat samaa luokkaa, joten tehosta ei löytynyt syytä simulaattorin laskemaa pidempää kuivausaikaa.

Kuivausajan eron suurta poikkeavuuden syytä yleisestä trendistä lähdettiin tarkastelemaan vertailemalla kuivuserien alkukosteuksia keskenään Kuivuri I ja Kuivuri II välillä. Käytettävissä olleista mittauspöytäkirjoista nähtiin, että kuivurien erien kuivaus on aloitettu samaan aikaan. Myös molempien kuivurien erät on puitu samoilta lohkoilta. Tästä voidaan olettaa, että myös kuivuserät on puitu samoihin aikoihin ja molempien kuivurien erät ovat keskenään ominaisuuksiltaan hyvin samalaisia taulukossa 17 on vertailtu koetilan kuivurien alkukosteutta, tehoa ja kuivausaikaa keskenään.

Taulukko 17. Koetilan kuivurien erien kosteuden ja kuivausajan vertailu

	Alkukosteus		teho		kuivausaika		kuivaus %/h	
	I	II	I	II	I	II	I	II
erä 1	24	24	196	172	9,7	9,6	1,03	1,08
erä 2	21	21	235	175	8,1	8,1	0,93	0,91
erä 3	22	22	190	177	6,9	6,9	1,28	1,28
erä 4	25,3	22	143	176	10,4	9,7	1,16	0,90
erä 5	19	22	257	175	7,5	6,5	0,80	1,38
erä 6	17	17	192	175	4,7	3,7	0,91	1,08
erä 7	16	15	189	175	3,7	3,7	0,95	0,41
erä 8	15,5	17	192	173	3,7	3,9	0,70	1,21
erä 9	19,5	15,5	188	174	6,2	3,4	1,03	0,76
erä 10	18	19,5	189	173	5,2	5,1	0,96	1,14

Taulukosta 17 voidaan nähdä, että kuivauserissä 4, 5 7, 8, 9 ja 10 alkukosteudessa on erien välillä eroa. Kun vertaa vastaavia kuivausaikoja, erot eivät noudata samaa kaavaa. Myöskään Kuivuri I:n tehon vaihtelu erien välillä ei tue johdonmukaisesti kuivausajan eroja. Jos tarkastellaan kuivausprosentin muutosta tuntia kohden, vaihtelu erien välillä on suurta. Kuivuri I: n kohdalla suurimpien tehon kohdalla, kuivausprosentti tuntia kohden on pienempi. Kuivuri II kohdalla tehon vaihtelu erien välillä ei ole merkittävä, mutta vaihtelu kuivausprosentti tuntia kohden silti suuri erien välillä. Todellisuudessa vaihtelu erien välillä ei ole näin suurta. Edellä olevista asioista voidaan selkeästi nähdä, että alkukosteuden mittauksissa on epätarkkuutta. Tämä aiheuttaa prosentuaalisen poikkeaman vaihtelua erien välillä koetilan kuivurien välillä.

Jaakko -kuivurin alkukosteuksien ja kuivausaikojen vertailu on esitetty Taulukossa 18.

Taulukko 18. Jaakko kuivurin erien kosteuden ja kuivausajan vertailu

	Alkukosteus	teho	kuivausaika	kuivaus %/h
erä 1	22,9	269	10,0	1,06
erä 2	24,8	292	9,0	1,39
erä 3	23,7	278	10,0	1,12
erä 4	24	283	9,3	1,28
erä 5	26,4	307	10,5	1,36
erä 6	25	316	7,0	1,89
erä 7	23,7	311	7,0	1,66
erä 8	22,3	315	7,5	1,35
erä 9	24	307	8,0	1,46
erä 10	24,2	297	7,0	1,81

Tarkastelemalla mittaustuloksia voidaan huomata heti, että kuivausajat eivät ole loogisia alkukosteuden suhteen. Kuivausnopeuden ollessa noin 1.1 % - yksikköä/h. kuivausajan prosentuaalinen heitto alle 10 prosentin luokkaa vehnällä. Ohralla luku se taas on 1,4.% - yks./h. Tässäkin vaihtelu eri erien välillä on suurta kuivauserien välillä. Tämä tarkoittaa sitä, että myös Jaakko kuivurin kohdalla alkukosteuden mittaustarkkuudessa on ollut epätarkkuutta.

### 6.2.2 Uunin teho

Simulaattorin tarkkuutta tarkasteltaessa taulukoista 5, Kuivuri I:n osalta voidaan todeta, että ilmamäärällä 15000 m<sup>3</sup>/h simulaattorilla saatu tehon poikkeama verrattuna polttoaineen kulutuksesta laskettuun tehoon, on kahdeksan kertaa kymmenestä vaaditun toleranssin sisällä. Taulukosta voidaan todeta myös se, että tehon arvo ylittää keskimäärin n. 23 % valmistajan ilmoittaman nimellistehon. Simuloitaessa 200kw:n nimellisteholla, päästään vaaditun toleranssin sisäpuolelle myös 9 kertaa kymmenestä. Prosentuaalista poikkeamaa tarkasteltaessa ollaan muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta erittäin lähellä polttoaineen kulutuksen perustuvaa arvoa.

Kuivuri II:n osalta voidaan tarkastella tehon arvoja taulukosta 10. Ilmamäärällä 15000 m<sup>3</sup>/h, tehon arvot ylittävät jokaisessa tapauksessa sallitun poikkeaman. Teholla 200 kW pysytään sallitussa poikkeamassa. Kuivuriin I verrattuna poikkeama on huomattavasti suurempi. Tämä ilmiön taustalla on se, että kuivuri II on eristetty, jolloin hyötysuhde polttoaineen kulutuksessa on parempi, kuin

kuivuri I: kohdalla. Tämä on nähtävissä selkeästi verrattaessa kuivurin I ja II laskennallista tehoa keskenään.

Jaakko kuivurin kohdalla ei ollut käytössä mittausarvoja polttoaineen kulutuksesta. Verrattaessa simulaattorin antamia arvoja, taulukko 14, valmistajan ilmoittamaan tehoon, poikkeamat olivat pieniä. Tässä kuitenkin on huomioitava, että tarvittava teho määräytyy ulkoilman mukaan. Simuloinnissa on käytetty vuorokauden keskilämpötilaa, mutta erät on kuivattu päiväsaikaan. Neljän asteen keskilämpötilan nousu vähentää simulaattorin mukaan tehon tarvetta noin 20 %.

### **6.2.3 Veden poistuminen**

Veden poistumisen mittaaminen ei varsinaisesti kuulunut tehtävän antoon. Poistuneen veden määrä oli simulaattorista kuitenkin helppo saada. Lisäksi se oli hyödyllinen tieto tarkasteltaessa simulaattorien tulosten tarkkuutta. Tarkasteltaessa koetilan kuivurien prosentuaalisia poikkeamia mitattuihin arvoihin, taulukko 5 ja 10, poikkeamat olivat välillä -39 , , , 185 %. Tarkasteltaessa poikkeavuuksia poistettua vesikiloa tuntia kohden, poikkeamat olivat -1 , , , 303 % välillä. Mitattujen arvon kuivauseräkohtainen eri oli merkittävä. Suurin arvo verrattuna pienimpään arvoon kuivuri I:n kohdalla on kaksinkertainen ja kuivuri II:n kohdalla lähes kolminkertainen. Mikään muu mitattu arvo, eikä niiden virhemarginaali tue noin suurta vaihtelua. Arvot ei yksinkertaisesti voi pitää paikkaansa. Jaakko kuivurin kohdalla. ei ollut käytettävissä mittaustietoa

Tarkasteltaessa simulaattorien antamia arvoja (kg/h), vaihteluväli kuivatuserien erittäin vähäinen. Tämä vaihtelu ovat on perusteltavissa tehon vaihtelulla jonkin verran myös ilmankosteudella ja ulkolämpötilalla. Myös simulaatio-ohjelman rakenne aiheuttaa rajatapauksissa muutaman kilon heiton.

## 7 JOHTOPÄÄTÖKSET

### 7.1 Käytettävyys

Testauksen perusteella simulaattoria voidaan pitää helppokäyttöisenä ja helposti otettavissa käyttöön. Käyttöliittymä on selkeä ja varmatoiminen. Simulaattoria voidaan käyttää ongelmitta tavanomaisella, joka kodista löytyvällä tietokoneella, josta löytyy MS Office Excel taulukkolaskentaohjelma. Kun lähtöarvot ovat tiedossa, voidaan ne syöttää helposti simulaattoriin. Alas vetovalikoista olevat oletuslämpötilat ulkolämpötilan osalta olivat liian alhaisia. Tämä ongelma voitiin sivuuttaa kirjoittama haluttu arvo soluun manuaalisesti. Tämä asia on helposti muutettavissa.

Varsinainen simulointiprosessi kesti 15 , , , 20 sekuntiin. Kuivurin kokoa haettaessa ei tämä aika tuntunut liian pitkältä. Testausvaiheessa simulointeja toistettiin moninkertaisesti verrattuna simulaattorin varsinaiseen käyttötarkoitukseen, eli oikean kuivurikoon hakemiseen. Moninkertaisesta määrästä huolimatta prosessi ei tuntunut liian hitaalta.

Simulaattorin laskemat tulokset tulevat selkeästi omalle harmaalla taustalla varustetulle ruudulle. Simulointiprosessin etenemistä voi helposti seurata oikeassa yläkulmassa ”pyörivästä” luvusta. Vesimäärän poistumisnopeuden osalta simulaattori antaa arvon heti, kun lähtötiedon on syötetty. arvo ei ole oikea, koska arvo on laskettu edellisen simuloinnin kuivausajan mukaan. Arvo(t) korjaantuu, kun simulointiprosessi on suoritettu loppuun.

Käyttöliittymän vieressä oleva käyrän tarkoitus on kuvata graafisesti veden poistomäärän muutosta ajan suhteen viljan kosteuden eri vaiheissa. Tämän käyrän informatiivisuus on heikko. Eri simulaatioiden välillä silmin erotettava muutos on lähinnä käyrän pituus. Muutamista puutteista huolimatta simulaattori vastasi kokonaisuudessaan sille sille asetettuihin vaatimuksiin käytettävyyden suhteen. Käytettävyydessä olevat puutteet liittyivät vaatimusten ulkopuolella oleviin ominaisuuksiin.

## 7.2 Lähtötietojen saaminen

Pienen askartelun jälkeen pystytään määrittämään tilan vuorokautinen kuivauskapasiteetin tarve. Simulaattorilla voidaan sitten simuloida kuivurin eräkokoja. Kuivausajankohtaan sopiva ulkolämpötila löytyi tilastoista, joihin pääsee helposti käsiksi internetin välityksellä. Tavoitekosteus sekä eri viljojen hehtolitrapainot olivat myös helposti löydettävissä. Alkukosteus eli puintikosteus vaatii jo asiantuntemusta ja ehkä tilan omaa tilastotietoa. Myös tästä oli helposti löydettävissä tilastotietoa. Ainoastaan ilman suhteellisesta kosteudesta oli vaikea löytää tilastotietoa. Tämän arvon vaihtelun vaikutus lopputulokseen ei ollut kuitenkaan merkittävä. Tähän löydettiin vastaus tekemällä herkkyysanalyysi simuloimalla samaan viljaerää muuttamalla ilman suhteellisen kosteuden arvoa viiden prosenttiyksikön välein. Tähän valittiin arvo kuivausajan vaihteluväin keskivaiheelta.

kuivurin kokoon liittyen tarvittavat tiedot oli helppo löytää kuivurin valmistajien tiedotteista. Kuivuriuunin kohdalla ongelmana oli Antti kuivaamojen kohdalla ilmoitettujen arvojen paikkansa pitävyys. Valmistajan ilmoittamalla ilmamäärällä kuivausilman lämpötilan saavuttamiseksi olisi tarvittu noin 25 % enemmän tehoa, kuin valmistajan ilmoittama teho oli. Tämä oli kuitenkin helposti havaittavissa simuloinnissa. Ilmamäärän sovittaminen uunin maksimiteholle päästiin lähelle mittauksissa satua ilmamäärää. Huomioitaessa uunin hyötysuhde tehossa, päästiin erittäin lähelle mitattua ilmamäärää. Jaakko Kuivurin osalta valmistajan ilmoittamat arvot vaikuttivat simuloinnin perusteella olevan linjassa todellisten arvojen kanssa. toisaalta Jaakon uunista ei ollut käytettävissä mitattua dataa ilmamäärästä.

Johtopäätöksenä voidaan sanoa, että simulaattorista saadaan ulos tarvittava kuivaussiilon kokonaistilavuus, kuivausaika sekä uunin teho ja ilmamäärä. Pieni särö jää kuitenkin siitä, että uunin arvojen kohdalla ei voida välttämättä luottaa valmistajan antamiin arvoihin simulointia tehdessä. Voidaan kuitenkin todeta, että ilmoitetut arvot yhdessä paljastavat mahdollisin poikkeaman jossain ilmoitetussa arvossa.

### 7.3 Simulaattorin tarkkuuden arviointi

Simulaattorin tarkkuutta arvioitiin simuloimalla mitatut kuivausarvot ja vertailemalla simulaattorin laskemia tuloksia. Suurelta osin arvot pysyivät asetetun vaihteluvälin sisällä. Tarkasteltaessa huolellisemmin mitattuja arvoja voitiin todeta, monen erän kohdalla alkukosteus ei voi pitää paikkaansa. Vertailtaessa keskenään eri erien kuivausaikoja voitiin todeta, että lähtökosteuden ja loppukosteuden erotus ei ollut mitenkään johdonmukainen kuivausajan kanssa. Suurempi erotus ei välttämättä tarkoittanut pidempää kuivausaikaa mitatuissa arvoissa. Tämä kielii siitä, että kosteutta mitattaessa mittari on näyttänyt suurempaa kosteusprosenttia, kuin viljan kosteusprosentti on ollut. Syynä tähän voidaan pitää sitä, että puintiajankohtana tapahtunut sade tai kaste on kostuttanut jyvän pinnan. Tämä vääristää mittaustulosta, etenkin jyvää rikkomattomalla kosteusmittarilla mitattaessa. Tätä olettamusta tukee myös se, että simuloitaessa polttoaineen kulutukseen perustuvan tehon arvoilla kuivausajan tulokset eivät ole mitenkään linjassa mitattujen aikojen kanssa.

Lähimpänä mitattuja aikoja päästään Koetilan kuivureilla käytettäessä valmistan ilmoittamaa uunin tehoa ja sopeuttamalla ilmapvirtaus tehoon sopivaksi. Jaakko kuivurilla ilmamäärän tai tehon perusteella tehdyllä simuloinnilla ei ole suurta eroa. Kuivausajan osalta simulaattori täyttää sille asetetun tarkkuusvaatimuksen.

Tehoa arvioitaessa eniten huomiota kiinnittää tehon suuri vaihteluväli kolmen kuivauserällä kuivuri I. kohdalla. Kuivuri II kohdalla vaihtelua erien kohdalla ei ole juuri ollenkaan. Tämä selittyy suurelta osin kuivuri II eristämisellä. Eristämällä kuivausympäristö on saatu stabiilimmaksi. Eristämätön kuivuri on herkempi ulkoisille sään vaihteluille. Eristäminen näkyy myös tehon tarpeessa. Tehon tarve on keskimäärin yli 20kW pienempi verrattuna Kuivuri I:n. Jaakko kuivurin kohdalla ei ollut käytettävissä mitattua tehon arvoa

Tehon kohdalla päästään lähelle mitattua arvoa. Kuivuri I:n kohdalla kolmea poikkeusta lukuun ottamatta 4 , , 6 % poikkeamassa. Kuivuri II. n kohdalla noin 15 prosentin poikkeamassa. Suurempi poikkeama selittyy paremmalla



energiatehokkuudella. Energiatehokkuuden kohdalla päästään reilusti alle vaihteluvälin.

Veden poistumisen laskemistarkkuutta ei voida arvioida mitenkään mitattujen arvojen perusteella. Vaikka mitatussa veden poistumassa olivat mukana myös viljasta poistetut epäpuhtaudet, määrä oli huomattavasti pienempi kuin laskennallinen poistetun veden määrä. Laskennallista mallia tarkastellessa ei ainakaan katsojan silmiin osunut mitään, joka kyseenalaistaisi kaavan tarkkuuden. Tätä ominaisuutta ei tehtävän annossa vaadittu, mutta siitä huolimatta se pitää olla luotettava, jos ominaisuus löytyy simulaattorista.

## **7.4 Mahdolliset jatkotutkimukset**

Simulaattorin todellinen tarkkuus ei tullut esille testausmateriaalin epätarkkuuden vuoksi. Jatkotutkimuksena olisi mielenkiintoista selvittää simulaattorin todellinen tarkkuus kuivausajan suhteen. Testauksen aikana ilmeni tiettyjä seikkoja, jotka tukivat simulaattorin tarkkuutta verrattuna tämän työn tuloksiin. Tämän varmistamiseksi tarvittaisiin testausta huomattavasti suuremmalla määrällä mittaussaineistoa.

## 8 KIITOKSET

Haluan kiittää työni ohjaajia professori Jukka Ahokasta ja apulaisprofessoria Antti Lajusta opastuksesta ja tuesta tutkielmani valmiiksi saattamiseksi. Haluan myös kiittää Dosentti Mikko Hautalaa, joka on ollut apuna työn teknisiä ratkaisuja pohdittaessa.

Kiitän myös professori Laura Alakukkoa hyvistä opeista ja kannustavista neuvoista. Lisäksi haluan kiittää ylipoistolehtori Hannu Mikkolaa ja johtaja Tapani Jokiniemeä korvaamattomasta teknisestä tuesta tutkielmani valmiiksi saattamisessa.

Lopuksi halun kiittää poikaani Lucasta, joka on positiivisella olemuksellaan kannustanut viemään tämän projektin maaliin.

## 9 LÄHTEET

Ahokas, J. & Hautala M. 2011 Maatilakuivurit. Helsingin yliopisto.

Ahokas, J. & Koivisto, K.,1983. Energiansäästö Viljankuivauksessa. Vakolan tutkimusselostus no. 31. Vihti. 89 s.

Bell, B.1989. Farm Machinery. 3. painos. UK:Farming Press Books. 265 s.

Brooker, Donald B., Bakker-Arkema, F.W., Hall Carl W. 1992. Drying and Storage Of Grains and Oilseed. Springer. New York: Van Nostrand Reinhold. 450 s.

Esite. Antti Agrosec. Antti Teollisuus Oy

Esite. Antti Teollisuus 2005

Kleemola, E., Järvenpää, M. & Peltola A. 1994. Viljansäilöntäopas. Työtehoseuran maataloustiedote 4/1994 (441). Helsinki: TTS. 15 s.

Peltola, A. 1997. Viljaa kierrättävän lämmينilmakuivurin säädöt. Työtehoseuran julkaisuja 355. Helsinki: Tummavuoren kirjapaino Oy. 187 s.

## **LIITTEET**

Liite 1. Adiabaattilämpötila -ohjelma

Liite 2. Kuvausohjelma -koodi

Liite 3. Antti Agrosec tekniset tiedot: kuivuri

Liite 4. Antti Agrosec tekniset tiedot: uuni

Liite 5. Aitta - Jaakko tekniset tiedot: kuivuri

Liite 6. Aitta - Jaakko tekniset tiedot: uuni

## Liite 1. Adiabaattilämpötila -ohjelma

```
Sub kuivuri()
For i = 1 To 100
For j = 11 To 35
Cells(i, j) = Clear
Next j
Next i

'tuleva ilma
'-----

qv = Cells(3, 6) 'tulevan ilman tilavuusvirta m^3/h/m^2 [F3]
RHalussa = Cells(3, 4) 'sisääntulevan kosteus [D3]
Ts = Cells(4, 5) 'sisääntulevan ilman lämpötila C [E4]
walussa = Cells(4, 1) / 100 'viljan kosteus [A4]

'Etsitään Tadiab ja xadiab, johon ilma päätyy, kun RH=100'
'-----

a = -27405.53
B = 97.5413
C = -0.146244
D = 0.000126
E = -0.0000000485
F = 4.34903
G = 0.00394
R = 22105649.25
p0 = 100000# 'ilmanpaine pascalleina
Tapu = Ts + 273 'pitää olla kelvineitä
pkyll = R * Exp((a + B * Tapu + C * Tapu ^ 2 + D * Tapu ^ 3 + E * Tapu ^ 4) / (F * Tapu - G * Tapu ^ 2))
'RH=100 '
xalussa = RHalussa / 100 * 18 / 29 * pkyll / p0
apulainen = 1
For i = Ts To 0 Step -1
    Tapu = i + 273
    xs = 18 / 29 * R * Exp((a + B * Tapu + C * Tapu ^ 2 + D * Tapu ^ 3 + E * Tapu ^ 4) / (F * Tapu - G * Tapu ^ 2)) / p0
    apu = (Ts - Tapu + 273) / (xs - xalussa)
    If (apu > 2500) Then
        Tadiab = Tapu - 273
        xadiab = xs
        apulainen = -1
        GoTo ulos
    End If
Next i
End Sub
```

## Liite 2. Kuvausohjelma -koodi

Sivu 1 / 5

```
Sub kuivuri()  
For i = 1 To 100  
For j = 11 To 35  
Cells(i, j) = Clear  
Next j  
Next i  
  
'tuleva ilma  
'-----  
qv = Cells(3, 6) 'tulevan ilman tilavuusvirta m^3/h/m^2 [F3]  
RHalussa = Cells(3, 4) 'sisääntulevan kosteus [D3]  
Ts = Cells(4, 5) 'sisääntulevan ilman lämpötila C [E4]  
walussa = Cells(4, 1) / 100 'viljan kosteus [A4]  
  
'Etsitään Tadiab ja xadiab, johon ilma päätyy, kun RH=100'  
'-----  
a = -27405.53  
B = 97.5413  
C = -0.146244  
D = 0.000126  
E = -0.0000000485  
F = 4.34903  
G = 0.00394  
R = 22105649.25  
p0 = 100000# 'ilmanpaine pascaleina  
Tapu = Ts + 273 'pitää olla kelvineitä  
pkyl = R * Exp((a + B * Tapu + C * Tapu ^ 2 + D * Tapu ^ 3 + E * Tapu ^ 4) / (F * Tapu - G * Tapu ^ 2)) 'RH=100 '  
xalussa = RHalussa / 100 * 18 / 29 * pkyl / p0  
apulainen = 1  
For i = Ts To 0 Step -1  
Tapu = i + 273  
xs = 18 / 29 * R * Exp((a + B * Tapu + C * Tapu ^ 2 + D * Tapu ^ 3 + E * Tapu ^ 4) / (F * Tapu - G * Tapu ^ 2)) / p0  
apu = (Ts - Tapu + 273) / (xs - xalussa)  
If (apu > 2500) Then  
Tadiab = Tapu - 273  
xadiab = xs  
apulainen = -1  
GoTo ulos  
End If
```

Next i

ulos:

'kaavoja:

D2 = 0.0000229

D3 = 2.0123

D4 = 195.267

' sitten aloitetaan varsinainen kuivausohjelma

'-----

koko aika = 30 'aika tunteja [H4]

dt = 0.03 'aika-askele

imax = koko aika / dt

dx = 0.01 'yhden kerroksen paksuus m

paksuus = Cells(20, 3) 'viljakerroksen paksuus [C20]

kerroksia = Round(paksuus / dx)

Hehtolp = Cells(4, 7) 'lisätty 23.3.12 [G4]

elementtikoko = Cells(31, 1) 'lisätty 23.3.12 kuivauskennon tilavuus [A31]

mkenno = Hehtolp \* elementtikoko \* 10 / 4 'lisätty 23.3.12 kuivauskennon viljan määrä kg

mv = mkenno / kerroksia 'kg kuivaa viljaa//kerros/m^2=700 kg/m^2=700 kg/m^3

ilmantiheys = 1

lh = 2500 'höyrystymislämpö kJ/kg

ci = 1 ' kJ/kg\*K

'alussa=sissän tuleva ilma

Dim w(1000, 100)

Dim wapu(1000, 100)

Dim T(1000, 100)

Dim x(1000, 100)

Dim RH(1000, 100)

Dim wk(1000)

wk(1) = walussa

For i = 1 To imax Step 1 'huom. tulee väärä arvoja: varmistetaan vain että on jotkut arvot

For j = 1 To kerroksia

w(i, j) = walussa ' alkukosteus

T(i, j) = Ts 'alussa viljan lämpötila on Ts ?????????? 'TÄSSÄ OLI VIRHE

x(i, j) = xalussa

RH(i, j) = RHalussa

Next j

Next i

For i = 2 To imax

w(i, 1) = wk(i - 1)

For j = 2 To kerroksia

Tapuva = T(i - 1, j)

k = Exp(20.95 - 6942 / (T(i - 1, j) + 273)) 'T=????????

Tapu = T(i - 1, j) + 273

pkyl = R \* Exp((a + B \* Tapu + C \* Tapu ^ 2 + D \* Tapu ^ 3 + \_  
E \* Tapu ^ 4) / (F \* Tapu - G \* Tapu ^ 2))

RHapuva = x(i, j - 1) \* 100 \* 29 / 18 \* p0 / pkyl '29/18 VÄÄRINPÄIN

RH(i, j) = x(i, j - 1) \* 100 \* 29 / 18 \* p0 / pkyl

'RH(i, j) = Min(RH(i, j), 99) '????????

'SEURAAVASSA LOG EI VÄLTÄMÄTTÄ OIKEIN, PITÄISI KAI OLLA LN-LOGARITMI \_

MUTTA MITEN TEHDÄÄN??

we = (Log(1 - RH(i, j) / 100) / (-D2 \* (T(i - 1, j) + D4))) ^ (1 / D3) / 100 'modified Henderson equation

dw = k \* (w(i - 1, j) - we) \* dt 'TÄSSÄ OLI VIRHE

w(i, j) = w(i - 1, j) - k \* (w(i - 1, j) - we) \* dt

wapu(i, j) = w(i, j)

dmw = dw \* mv 'kerroksesta poistunut vesi

T(i, j) = T(i, j - 1) - dmw \* lh / (ci \* qv \* dt \* iliantiheys)

x(i, j) = x(i, j - 1) + dmw / (iliantiheys \* qv \* dt)

RH(i, j) = x(i, j) \* 100 \* 29 / 18 \* p0 / pkyl

xapuva = x(i, j)

Tapuva = T(i, j)

'vertailu = (x(i, j) > xadiab) Or (T(i, j) < Tadiab)

'If vertailu Then

If x(i, j) > xadiab Or T(i, j) < Tadiab Then

T(i, j) = Tadiab 'TÄSSÄ OLI VIRHE

x(i, j) = xadiab

GoTo pois

'RH(i,j)=100

'TÄSSÄ PITI BREAKIN PANNA POIS, TOIMIIKO OIKEIN?



```

        'break
    End If
    'Cells(i, j) = w(i, j)
Next j
poies:

japu = j
For jj = japu + 1 To kerroksia 'TAMA
    RH(i, jj) = RH(i, japu)
    T(i, jj) = T(i, japu) 'TÄSSÄ OLI VIRHE
    x(i, jj) = x(i, japu)
    w(i, jj) = w(i - 1, jj)
    wapu(i, jj) = w(i - 1, jj) 'TÄMÄ
    ' Cells(i, jj) = w(i - 1, jj)
Next jj
'TÄHÄN LISÄÄ:
summa = 0
pkenno = paksuus
elementti = Cells(31, 3) 'lisätty 23.3.2012 [C31]
kennoja = elementti * 4 ' muutos 23.3.2012
'vat = Cells(31, 4) 'lisätty 23.3.12 varastosiilon tilavuus [D31]
'kut = Cells(31, 1) 'lisätty 23.3.12 kuivauskennon tilavuus [A31]
pvarasto = (Cells(31, 5) * Cells(31, 6)) + Cells(41, 4) ' huomioitu myös kannen ja jalustan korkeus
For jj = 2 To kerroksia
    summa = summa + w(i, jj)
Next jj

wka = summa / (kerroksia - 1)

wk(i) = (pkenno * kennoja * wka + pvarasto * wk(i - 1)) / _
(pkenno * kennoja + pvarasto)
For jj = 1 To kerroksia

    w(i, jj) = wk(i) ' alkukosteus
    wapu(i, jj) = w(i, jj)
Next jj
For jj = 2 To kerroksia
    'Cells(i, jj) = wapu(i, jj)
    'Cells(i, 11) = wk(i)

```

```
Next jj
```

```
Next i
```

```
For i = 20 To imax Step 10
```

```
For j = 2 To kerroksia
```

```
Cells(i / 10, j + 10) = wapu(i, j) * 100
```

```
Cells(i / 10, 11 + 11) = wk(i)
```

```
If wk(i) < Cells(4, 2) / 100 Then
```

```
GoTo ulos2:
```

```
End If
```

```
Cells(3, 8) = dt * i
```

```
Cells(i / 10, 11) = dt * i
```

```
Cells(27, 1) = wk(i)
```

```
Next j
```

```
Next i
```

```
ulos2:
```

```
End Sub
```

```
Function pkas(T)
```

```
Rem Lämpötilan T yksikkö on Celsius. Yhtälö laskee lämpötilaa vastaavan kastepisteen osakaasun.
```

```
Rem Kyse on suurimmasta osapaineesta kyseisessä lämpötilassa. Yhtälön paine on Pascal
```

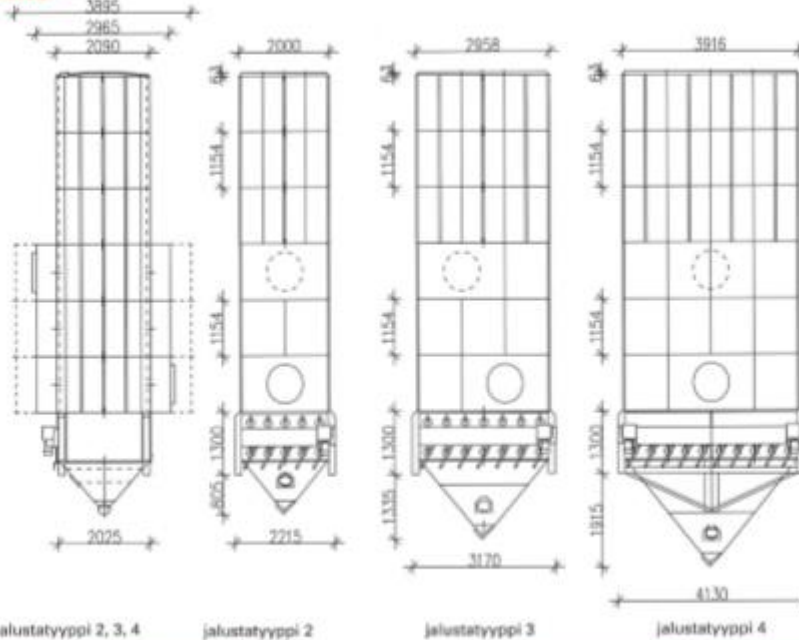
```
T = T + 273.16
```

```
pkas = Exp(77.345 + 0.0057 * T - 7235 / T) / (T ^ 8.2)
```

```
End Function
```

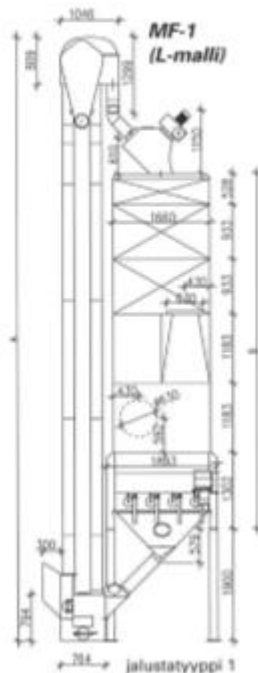
### Liite 3. Antti Agrosec tekniset tiedot: kuivuri

**Agrosec**  
**mixflo**



Kuivurimallin selite	
22MF2	merkitys
22MF2	kuivauskennojen määrä
22MF2	yläsäiliöiden määrä
22MF2	tyyppi mixflo
22MF2	jalustatyyppi 2/3/4

Jalustatyyppi	Tilavuudet			
	1	2	3	4
Jalusta, m³	1,2	2,00	3,00	4,00
Kuivauskenno, m²	2,0	3,12	4,68	6,24
Yläsäiliö, m³	2,2	4,32	6,48	8,64
Kansi	0,7			



Kuivuri malli	Tilavuus	Elevaattori tyyppi/korkeus	Kuivuri tuuri	Esipuhdistin
23MF1	12,6m³	A70/11,6m	200	0,75kW
33MF1	14,6m³	A70/12,6m	200	0,75kW
44MF1	18,8m³	A70/14,6m	300	0,75kW
22MF2	16,9m³	A70/11,6m	200	0,75kW
23MF2	21,2m³	A70/12,6m	200	0,75kW
33MF2	24,3m³	A70/13,6m	300	0,75kW
34MF2	28,6m³	A70/14,6m	300	0,75kW
44MF2	31,8m³	A90/15,6m	400	2,2kW
45MF2	36,1m³	A90/16,6m	400	2,2kW
54MF2	34,9m³	A90/16,6m	500	2,2kW
55MF2	39,2m³	E80/18,7m	500	2,2kW
65MF2	42,3m³	E80/19,7m	700	2,2kW
75MF2	45,4m³	E80/20,7m	700	2,2kW
85MF2	48,6m³	E80/21,7m	1000	2,2kW
23MF3	31,8m³	A90/13,6m	300	2,2kW
33MF3	38,5m³	A90/15,1m	500	2,2kW
34MF3	43,0m³	A90/16,6m	500	2,2kW
44MF3	47,6m³	E100/17,7m	700	4,0kW
45MF3	54,1m³	E100/18,7m	700	4,0kW
55MF3	58,8m³	E100/19,7m	700	4,0kW
65MF3	63,5m³	E120/20,7m	1000	4,0kW
75MF3	68,2m³	E120/21,7m	1000	4,0kW
23MF4	42,4m³	A90/15,6m	400	2,2kW
44MF4	63,5m³	E100/18,7m	1000	4,0kW
45MF4	72,2m³	E120/19,7m	1000	4,0kW
85MF4	97,1m³	E120/24,7m	2x1000	4,0kW

## Liite 4. Antti Agrosec tekniset tiedot: uuni



Vacboost 1000

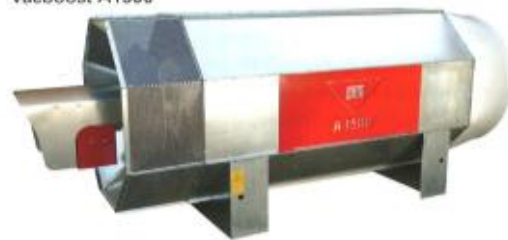


Hipress 1000

Puhallin 11 kW, 15 kW



Vacboost A1500



**Agrosec**  
heaters

### Agrosec VULCAN uunitaulukko

uuni	kätisyydet	teho kW	öljy kg/h	nestekaasu m³/h	maakaasu m³/h	moottori kW	ilmamäärä (80°C) m³/h	pituus	korkeus	leveys	ilmaputki halk.
HIPRESS 200	A, B, C, D	200	18.5	8.4	21.6	5.5	15000	3360	1350	2432	630
HIPRESS 300	A, B, C, D	300	27.8	12.7	32.5	7.5	20400	3360	1350	2432	630
HIPRESS 400	A, B, C, D	400	37.1	16.8	43.4	11	25200	3588	1680	2432	630
HIPRESS 500	A, B, C, D	500	46.4	21.2	54.3	15	33000	3588	1680	2432	800
HIPRESS 700	AB, CD	700	65.0	30.0	76.0	2 X 7.5	40800	5483	1690	4180	1000
HIPRESS 1000	AB, CD	1000	92.0	41.8	107.0	2 X 15.0	66000	5483	1690	4180	1250

uuni	kätisyydet	teho kW	öljy kg/h	nestekaasu m³/h	maakaasu m³/h	moottori kW	ilmamäärä (80°C) m³/h	pituus	korkeus	leveys	ilmaputki halk.
VACBOOST 200	A, B, C, D	200	18.5	8.4	21.6	5.5	15000	1857	1350	2432	630
VACBOOST 300	A, B, C, D	300	27.8	12.7	32.5	7.5	20400	1857	1350	2432	630
VACBOOST 400	A, B, C, D	400	37.1	16.8	43.4	11	25200	1912	1350	2432	630
VACBOOST 500	A, B, C, D	500	46.4	21.2	54.3	15	33000	1912	1350	2432	800
VACBOOST 700	A, B, C, D	700	65.0	30.0	76.0	2 X 7.5	40800	3676	1690	4180	1000
VACBOOST 1000	A, B, C, D	1000	92.0	41.8	107.0	2 X 15.0	66000	3676	1690	4180	1250
VACBOOST A1500 *)	A, B, C, D	1500	-	58.4	150.0	-	-	3700	1570	1380	1250

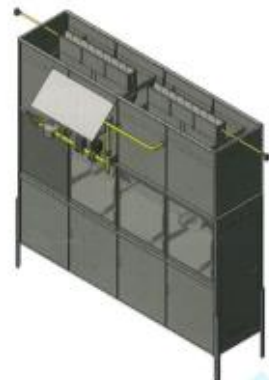
\*) ei ole lämmönvaihdistinta

Vaihtouuni vanhaan uunihuoneeseen	kätisyydet	teho kW	öljy kg/h	nestekaasu m³/h	maakaasu m³/h	moottori kW	ilmamäärä (80°C) m³/h	pituus	korkeus	leveys	ilmaputki halk.
A330	A, D	318	30,0	-	-	7.5	19000	2850	1521	1846	630
A250	A, D	244	24,3	-	-	5.5	14800	2850	1521	1846	630

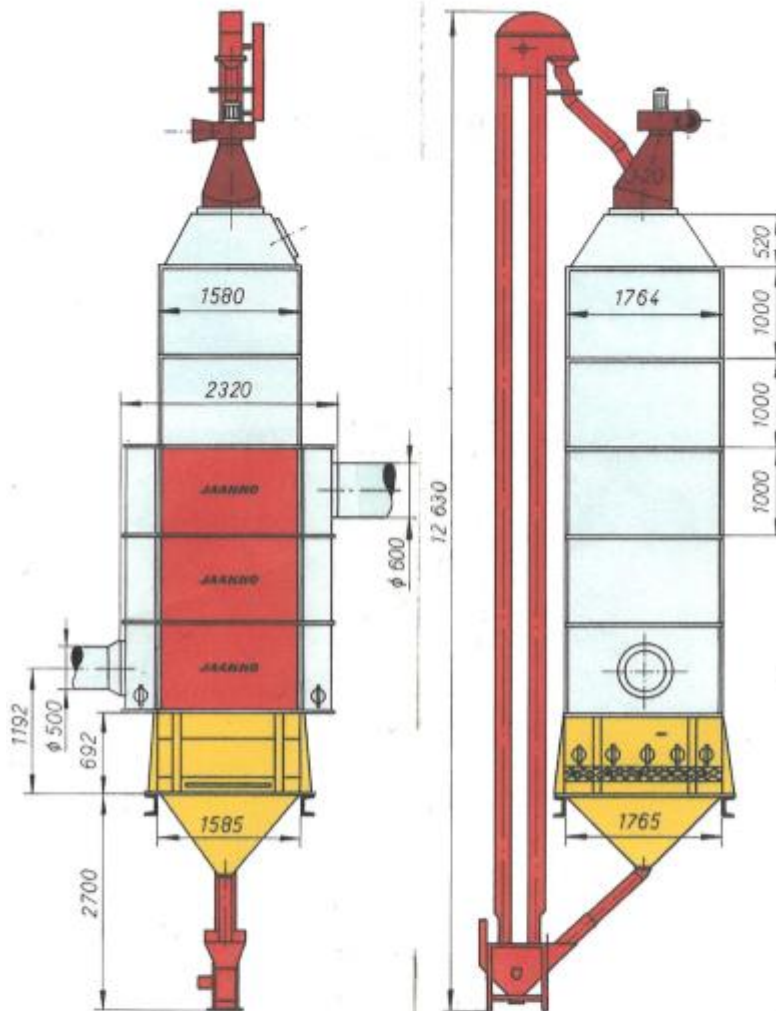
### Kanavapoltin

Kaasukäyttöinen kanavapoltin on osa kuivurin rakennetta. Metrin ilmakehänavia laitetaan kaksi rinnan ja niistä ulompi toimii kanavapoltin kanavana, josta se kipinäverkon läpi kääntyy kennopäätyihin. Kaasuna voi käyttää maa- tai nestekaasua. Etuna on suurien tehojen saavuttaminen edullisesti, laaja käyttöalue sekä 100% hyötysuhde lämmön tuottamiseen (ei hukkaa savukaasuna).

Kanavapoltinmallit				
Tyyppi	kW max.	jälustatyyppi	pituus	korkeus
DB1500	1500	2, 3	1991	3486
DB2000	2000	3, 4	2951	3486
DB3000	3000	4	3909	3486



## AITTA-JAAKKO 10,2 m<sup>3</sup>–19,7 m<sup>3</sup>



AITTA-JAAKKO on suuritehoinen silokuivuri, joka on tarkoitettu keskisuurille ja suurille tiloille. Syöttölaitteessa on 5 kpl pyöriviä syöttöteloja. Kuivauskennon tilavuus on 1,96 m<sup>3</sup>, viljatilaa 2,52 m<sup>3</sup>, syöttölaitteen 1,28 m<sup>3</sup> ja kannen 1,02 m<sup>3</sup>.

AITTA-JAAKKO	100	120	140	160	180
Vetoisuus (ilman kantta) m <sup>3</sup>	10,2	12,2	14,7	16,7	18,6
Vetoisuus (kännellisenä) m <sup>3</sup>	11,3	13,2	15,7	17,7	19,7
Teho haihd. vettä kg/h	195	240	240	280	325
Kuivauskennoja kpl	2	3	3	4	5
Viljatiloja kpl	2	2	3	3	3
Elevaattori tyyppi/moottori kW	J-55/5,5	J-55/5,5	J-55/5,5	J-55/5,5	J-55/5,5
Elevaattorin korkeus m	11,6	12,6	13,6	14,6	15,6
Suositt. kulvuriluuri	J 180	J 295	J 295	J 295	J 295

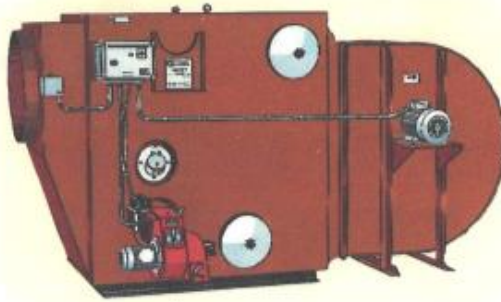


## Liite 6. Aitta - Jaakko tekniset tiedot: uuni

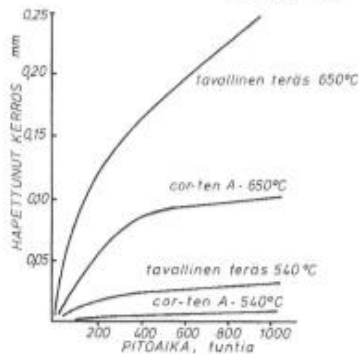
AUTOMAATTISET

**JAAKKO**

KUIVURIUUNIT

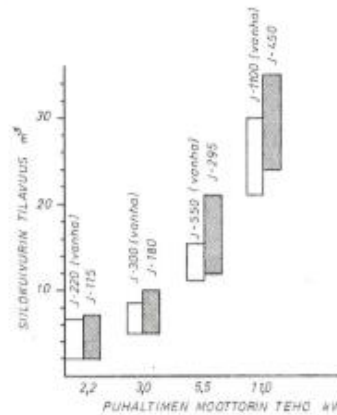


JAAKKO 180



Säikestävän teräksen hapettumiskestävyys korkeissa lämpötiloissa tavalliseen hiiliteräkseen verrattuna.

JAAKKO KUIVURIUUNIT VALMISTETAAN SARJATUOTANNOSSA. NÄIN VARMISTETAAN JOKAISEN ERILLISEN OSAN SOPIVUUS JA MITTATARKKUUS. LISÄKSI KAIKKI UUNIT KOEKÄYTETÄÄN TEHTAALLA ENNEN TOIMITUSTA, JA SÄÄDETÄÄN POLTTIMEN ARVOT KOHDALLEEN.



Uusien lämmönlähteiden tehoalueet vanhoihin lämmönlähteisiin verrattuna.

**JAAKKO**

KUIVURIUUNIEN TEKNISET TIEDOT

Malli	115	180	295	450
Ilmamaara m³/h 0,39 kPa (40 mm vp)	7700	11300	17500	25500
Ilmamaara m³/h 0,59 kPa (60 mm vp)	5900	10300	16400	24500
Polttokamm. raaka-aine	tul.k. 2 mm	tul.k. 2 mm	tul.k. 2 mm	tul.k. 2 mm
Max. öljynkulutus kg/h	12,4	19,5	28,0	44,0
Max. lämpöenergia kW/h	112,6	193	298	450
(kcal/h)	96900	166000	254500	387000
Öljypoltinmerkki	Oilon	Oilon	Oilon	Oilon
Moottorin teho kW	2,2	3	5,5	11
Kaksinkert. savupiippua vakiovarust.	4 m	4 m	4 m	4 m
Lämmönnousu	64°C	63°C		
Hinta (täysaut.)				



• JAAKKO-kuivuriuunit varustetaan kotimaisilla OILON-öljypolttimilla

• Uuneihin JAAKKO 115 OILON KP-26 yksisuutinpoltin

JAAKKO 180 OILON KP-26 yksisuutinpoltin tai

JAAKKO 295 OILON KP-26 H High-low kaksisuutinpoltin

JAAKKO 450 OILON KP-38 H High-low kaksisuutinpoltin

• Kaksisuutinpolttimessa toista suutinta ohjataan termostaatilla, joka kytkee lisäsuuttimen päälle kylmällä ilmalla automaattisesti.

• OILONin koko maan kattava varaosa- ja huoltoverkosto takaa häiriöttömän kuivauksen syksyn kiirekautena.